

THESE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université Lumière Lyon 2
Discipline : Géographie, Aménagement et Urbanisme

Présentée et soutenue publiquement par

Frédéric Liébault

Le 1^{er} décembre 2003

Les rivières torrentielles des montagnes drômoises : évolution contemporaine et fonctionnement géomorphologique actuel (massifs du Diois et des Baronnies)

Directeurs de Thèse :

M. Pierre Clément

Professeur émérite de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2

M. Hervé Piégay

Chargé de recherche au CNRS, UMR 5600 Environnement-Ville-Société

JURY :

M. Jean-Paul Bravard, Professeur de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2

M. Pierre Clément, Professeur émérite de Géographie à l'Université Lumière Lyon 2

M. Michel Goueffon, Ingénieur en Chef du Génie Rural des Eaux et Forêts, Service RTM de Grenoble, adjoint au délégué national RTM

M. G. Mathias Kondolf, Professeur de Géographie à l'Université de Californie-Berkeley (rapporteur)

M. Jonathan B. Laronne, Professeur de Géographie à l'Université Ben Gurion du Negev

M. François Petit, Professeur de Géographie à l'Université de Liège (rapporteur)

M. Hervé Piégay, Chargé de recherche au CNRS-UMR 5600 Environnement-Ville-Société

SOMMAIRE	Pages
<i>Remerciements</i>	6
<i>Résumé</i>	12
Introduction générale	15
1. Le cadre conceptuel	19
1.1. <i>Système fluvial et hydrosystèmes: deux concepts complémentaires</i>	19
1.1.1. Généralités et définitions	19
1.1.2. Le changement morphologique : mode de fonctionnement du système fluvial	22
1.2. <i>Le cours d'eau de montagne : un système fluvial original</i>	25
1.2.1. Terminologie	25
1.2.2. Le fonctionnement morphologique des rivières torrentielles	27
1.2.2.1. Le versant « source »	27
1.2.2.2. Le versant « contrainte »	33
1.2.3. La charge de fond des rivières torrentielles	34
2. Le cadre géographique	39
2.1. <i>Diois et Baronnies : présentation générale</i>	39
2.1.1. Le cadre morphostructural, les héritages quaternaires et holocènes	39
2.1.2. Le cadre climatique et hydrologique	44
2.1.2.1. Le cadre climatique	44
2.1.2.2. Le cadre hydrologique	46
2.2. <i>Les rivières torrentielles des montagnes drômoises et leurs émissaires</i>	53
2.2.1. La Drôme, l'Eygues et le Roubion : des rivières en cours d'incision	53
2.2.2. Caractéristiques des petites rivières torrentielles des montagnes drômoises	55
3. Le cadre méthodologique	63
3.1. <i>Les sources d'information</i>	63
3.1.1. Les sources documentaires	63
3.1.2. Les informations de terrain	64
3.2. <i>Les procédures d'échantillonnage</i>	65
3.3. <i>Les outils de traitement de l'information</i>	67
3.3.1. Les outils statistiques	67
3.3.2. Les outils cartographiques	69
Première Partie :	
les changements fluviaux contemporains dans leur environnement	71
Introduction	72
1. Les changements fluviaux contemporains	73
1.1. <i>Approches méthodologiques</i>	73
1.1.1. Analyses diachroniques documentaires des bandes actives	73
1.1.1.1. Les anciens documents topographiques et cartographiques des Ponts et Chaussées	73
1.1.1.2. Les photographies aériennes	74
1.1.2. Relevés de terrain des formes fluviales résiduelles	84
1.1.2.1. Les relevés topographiques	84
1.1.2.2. Les techniques de datation	85
1.2. <i>La rétraction des bandes actives</i>	89
1.2.1. Les tendances générales d'évolution	89
1.2.1.1. La période 1948-1991(96)	89
1.2.1.2. Evolutions depuis 1850	97
1.2.2. L'organisation géographique du changement fluvial	101
1.2.2.1. Comparaisons régionales	101
1.2.2.2. Structures longitudinales du changement	104

Sommaire

1.2.3. Analyses morphologiques et datations des changements fluviaux	109
1.2.3.1. Morphologies anciennes et actuelles	109
1.2.3.2. Les datations dendrochronologiques	121
1.2.3.3. Les datations radiométriques	125
1.3. Synthèse sur les changements fluviaux contemporains	127
2. Les changements de l'environnement	131
2.1. Correction torrentielle et changements de l'occupation du sol	131
2.1.1. Historique et bilan de la Restauration des Terrains en Montagne	131
2.1.1.1. Etat de la question	133
2.1.1.2. Approches méthodologiques	135
2.1.1.3. Les différents types de travaux réalisés	138
2.1.1.4. Chronologie des travaux	142
2.1.1.5. Répartition spatiale des travaux	144
2.1.1.6. Travaux RTM et extinction torrentielle	146
2.1.2. Les changements de l'occupation du sol et le tarissement des sources sédimentaires	147
2.1.2.1. Etat de la question	147
2.1.2.2. Approches méthodologiques	148
2.1.2.3. Tendances générales d'évolution et disparités régionales	153
2.1.2.4. La reconquête forestière et la stabilisation des sources sédimentaires	158
2.1.3. La nature et l'influence des changements de l'occupation du sol	161
2.2. Changements hydrologiques séculaires	163
2.2.1. Etat de la question	163
2.2.2. Approches méthodologiques	165
2.2.3. Evolution des crues de la Drôme à Luc-en-Diois depuis 1907	165
2.2.4. La nature et l'influence des changements hydrologiques	168
3. Synthèse explicative des changements fluviaux contemporains	173
3.1. La période 1850-1950	173
3.2. La période 1950-2000	174
Deuxième Partie :	
Morphologies fluviales et bassins versants	179
Introduction	180
1. Approches méthodologiques	183
1.1. Identification visuelle des types morphologiques	183
1.2. Les relevés morpho-sédimentaires	185
1.3. Détermination des caractéristiques des bassins versants	187
1.3.1. Les indicateurs morphométriques	187
1.3.2. Les indicateurs de relief et d'exposition	189
1.3.3. Les indicateurs géologiques	191
1.3.4. Les indicateurs de l'occupation du sol	193
1.3.5. Les indicateurs géomorphologiques	194
1.4. Approches statistiques	198
2. Typologie morphologique	199
2.1. Les lits à fond rocheux (morphotype E)	199
2.2. Les lits à blocs (morphotype D)	199
2.3. Les lits à fond plat grossier (morphotype C)	200
2.4. Les lits à fond plat caillouteux (morphotype B)	201
2.5. Les lits à nappes caillouteuses (morphotype A)	201
3. Discrimination des morphotypes à partir des caractéristiques du tronçon	207
3.1. Descriptions statistiques élémentaires	207
3.1.1. Les indicateurs morphologiques	207
3.1.2. Les indicateurs granulométriques	211
3.1.3. Les indicateurs dynamiques	213

Sommaire

3.2. <i>Discrimination à partir de relations statistiques élémentaires</i>	216
3.3. <i>Discrimination multivariée</i>	223
3.4. <i>Interprétation fonctionnelle</i>	227
4. Discrimination des morphotypes à partir des caractéristiques du bassin versant	233
4.1. <i>Discrimination par analyse inter-classe</i>	233
4.2. <i>Interprétation fonctionnelle</i>	239
5. Conclusion	243
	245
Troisième Partie :	
Le transport de la charge de fond	
Introduction	247
1. Les sites d'étude	249
1.1. <i>Présentation générale des bassins versants</i>	249
1.1.1. <i>Contexte morphostructural et implications géomorphologiques</i>	249
1.1.2. <i>Contexte hydrologique</i>	256
1.1.3. <i>Contexte historique</i>	256
1.2. <i>Présentation des tronçons de mesure</i>	260
2. Le dispositif de suivi	263
2.1. <i>Le suivi de la charge de fond</i>	263
2.1.1. <i>Principes de mesure</i>	263
2.1.2. <i>Le dispositif de mesure</i>	266
2.1.3. <i>Evaluation de la précision des mesures</i>	269
2.2. <i>Le suivi hydrologique des crues</i>	272
2.2.1. <i>Les sites de mesure</i>	272
2.2.2. <i>Le dispositif de mesure</i>	273
2.3. <i>Le suivi des précipitations</i>	277
3. Les fréquences et seuils de mise en mouvement de la charge de fond	279
3.1. <i>Fréquences inter-annuelles et occurrence saisonnière du charriage</i>	279
3.2. <i>Seuils de mise en mouvement de la charge de fond</i>	282
3.3. <i>Synthèse</i>	292
4. Les distances de transport de la charge de fond	295
4.1. <i>Approche événementielle</i>	295
4.2. <i>Distances annuelles de transport</i>	305
4.3. <i>Synthèse</i>	308
5. Les volumes charriés	311
5.1. <i>Approche événementielle</i>	311
5.2. <i>Charriages annuels</i>	316
5.3. <i>Synthèse</i>	321
6. Estimation de la recharge sédimentaire à l'échelle régionale	323
7. Conclusion	329
Conclusion générale	333
<i>Bibliographie</i>	341
<i>Liste des figures</i>	359
<i>Liste des tableaux</i>	371

PREMIERE PARTIE

Les changements fluviaux contemporains dans leur environnement

- 1. Les changements fluviaux contemporains***
- 2. Les changements de l'environnement***
- 3. Synthèse explicative des changements fluviaux contemporains***

INTRODUCTION

Depuis la dernière séquence de crise géomorphologique dans les Alpes françaises, située autour de 1850 [Bravard, 1989], les montagnes ont subi de profondes mutations socio-économiques qui ont indirectement entraîné une forte progression des couvertures végétales protectrices sur les versants (forêts et formations arbustives pour l'essentiel). Ces changements d'occupation du sol ont été accompagnés par de nombreux travaux dont l'objectif fut de réduire l'activité torrentielle par reboisement des versants et correction hydraulique des têtes de bassin. A cela, il faut ajouter les effets des modifications climatiques postérieures au Petit Âge Glaciaire, qui peuvent être partiellement à l'origine d'une raréfaction des extrêmes pluviométriques et hydrologiques [Bravard, 1991]. Comme l'avait déjà souligné Raoul Blanchard à son époque [1945], ces facteurs ont contribué à diminuer les flux solides et liquides en transit au sein des systèmes fluviaux, favorisant ainsi la rétraction des bandes de tressage [Bravard, 1989 ; Gautier, 1994 ; Garcia-Ruiz *et al.*, 1997 ; Miramont et Guilbert, 1997 ; Rinaldi *et al.*, 1997 ; Piégay et Salvador, 1997]. Cet enchaînement causal est parfois discuté au profit d'une interprétation fondée sur l'influence directe de la modification des pratiques agropastorales de fond de vallée. L'installation forestière et arbustive accélérée dans la bande active, observée essentiellement à partir des années 1950, est alors considérée comme la conséquence indirecte de l'arrêt du pastoralisme et de l'exploitation du bois dans les lits majeurs des rivières [Piégay, 1995].

A ce jour, il a été démontré dans les montagnes drômoises l'existence de profondes modifications morphologiques contemporaines dont les principales sont l'incision quasi-généralisée des profils en long et la diminution en largeur des bandes actives au profit de la végétation riveraine [Landon, 1999 ; Landon *et al.*, 1999 ; Liébault et Piégay, 2001]. Ces changements fluviaux ont été mis en évidence sur les axes de drainage principaux. Alors que l'incision est interprétée comme la conséquence directe des interventions humaines dans les lits fluviaux (endiguements, extractions de matériaux), celles-ci prenant place dans un contexte général de tarissement des apports sédimentaires, la rétraction des bandes actives constitue un phénomène plus difficile à cerner dans la mesure où elle est conditionnée par le jeu combiné de la dynamique fluviale et la dynamique de la végétation riveraine.

La plupart des études antérieures se sont concentrées sur l'étude des changements morphologiques qui ont affecté les tronçons principaux de grandes rivières de montagne (bassins versants supérieurs à 500 km²), dans des systèmes éloignés des sources sédimentaires. Dans un tel contexte, les liens qui unissent l'évolution des versants aux changements fluviaux sont difficiles à mettre en évidence car ils sont généralement masqués par l'importance des facteurs de contrôle agissant au sein des plaines alluviales. L'objectif de notre contribution est donc de mettre en lumière les relations entre les changements historiques contemporains qui ont affecté les versants et l'évolution des bandes actives sur un ensemble de petites rivières de montagne d'ordre 5 à 6, caractérisées par des liens plus étroits avec les versants.

1. Les changements fluviaux contemporains

1.1. Approches méthodologiques

Deux types d'approches méthodologiques ont été conduites pour étudier l'évolution contemporaine des formes fluviales. Les analyses diachroniques documentaires ont permis d'établir les tendances d'évolution des bandes actives sur une période maximale de 150 ans ; les analyses de terrain des formes fluviales résiduelles issues de ces changements ont facilité la compréhension des processus impliqués dans cette dynamique.

1.1.1. Analyses diachroniques documentaires des bandes actives

Plusieurs documents ont été mis à contribution pour reconstituer l'évolution des bandes actives. Les anciens plans disponibles aux Archives Départementales nous ont permis de remonter jusqu'à la fin du 19^e siècle sur un ensemble restreint d'affluents ; les photographies aériennes de la seconde moitié du 20^e siècle ont été exploitées sur l'ensemble des rivières torrentielles sélectionnées.

1.1.1.1. Les anciens documents cartographiques et topographiques des Ponts et Chaussées

Conservés aux Archives Départementales (série Travaux Publics), les anciens documents cartographiques et topographiques du service hydraulique des Ponts et Chaussées constituent une source d'information intéressante pour l'étude des changements fluviaux. Ces documents ont été réalisés dans le cadre de projets de travaux de protection de berges ou de construction de seuils. Ils datent généralement de la fin du 19^e siècle et rassemblent des plans détaillés de tronçons, assortis généralement de séries de profils en travers et de profils en long. Les plans concernent des tronçons généralement anthropisés, souvent courts (quelques centaines de mètres), parfois suffisamment longs pour obtenir une vision plus générale du cours d'eau (Fig. 32). Les échelles s'échelonnent entre le 1:500^{ème} et le 1:2500^{ème}. Les documents topographiques sont plus difficilement exploitables car ils sont souvent levés en altitudes relatives. Ils permettent cependant de calculer des pentes ou de décrire des sections transversales à un instant donné de l'histoire du ruisseau. Ces informations peuvent être comparées avec la morphologie actuelle et donner des indications ponctuelles supplémentaires sur l'évolution des lits fluviaux.

Les largeurs de bande active ont été mesurées sur les plans selon un protocole d'échantillonnage ponctuel systématique (Fig. 30). L'intervalle de mesure a été fixé à 50 mètres. Ces mesures ont été comparées avec celles effectuées sur les photographies aériennes selon le même protocole de façon à obtenir une tendance d'évolution. Les cours d'eau concernés sont présentés dans le Tableau 8. Les plans du cadastre napoléonien, établi entre 1822 et 1840, permettent également de reconstituer les anciennes bandes actives. Ces documents ont été utilisés sur la Bine et le Soubriou où les largeurs ont été mesurées tous les 50 mètres.

Tableau 8

Caractéristiques des anciens plans utilisés pour la mesure des largeurs de bande active ; leur localisation est présentée dans la Figure 34

Cours d'eau	Référence	Date	Echelle	Longueur du tronçon cartographié (m)
Béoux	AD 57S11	1870	1/1000	323
Bentrix	AD 53S35	1865	1/1000	730
Bine	plan du cadastre napoléonien	1828	1/10000	4750
Gervanne	AD 57S49	1867	1/2500	1950
Soubriion	plan du cadastre napoléonien	1828	1/10000	1400
Sure	AD 57S48	1864	1/1100	5395

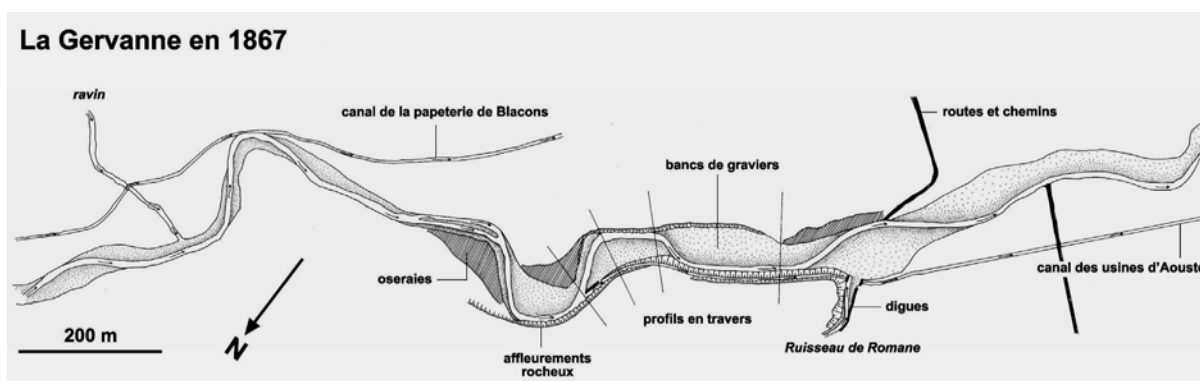


Figure 32

Exemple d'un ancien plan détaillé de cours d'eau établi par le service hydraulique des Ponts et Chaussées au 19^e siècle, La Gervanne en 1867; plan réalisé dans le cadre d'un projet d'endiguement (AD 57S49)

1.1.1.2. Les photographies aériennes

Le choix des missions

L'utilisation des photographies aériennes a permis de reconstituer l'évolution des bandes actives dans la seconde moitié du 20^e siècle. Plusieurs missions ont été sélectionnées. Les dates retenues sont les suivantes : 1948, 1971 ou 1972, 1956, 1991 ou 1996 (Tableau 9). Certaines missions aériennes n'étaient disponibles que sur un seul département, ce qui explique l'utilisation de missions différentes pour la période 1971-72. D'autre part, le coût élevé de ces documents nous a conduit à tirer profit des missions préalablement disponibles au sein des organismes partenaires, ce qui explique notamment l'utilisation de deux dates différentes pour caractériser l'état final (1991 ou 1996). Cet écart de 5 ans peut poser problèmes si des crues morphogènes importantes sont survenues entre ces deux dates. Ce fut le cas dans les bassins drômois. Des débits journaliers supérieurs à la crue centennale ont été enregistrés aux stations de Luc-en-Diois ($109 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Saillans ($387 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) et du Pont-de-la-Tune ($359 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) en janvier 1994. Le Roubion a également connu une crue majeure en octobre 1993, le pic de crue ayant été estimé à $240 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, valeur également supérieure à la crue centennale. Il est ainsi possible d'observer des différences d'évolution qui soient dues à l'utilisation de missions aériennes différentes. L'effet des crues de 1993-1994 a été testé sur le Rieu de Montaulieu, affluent de l'Eygues sur lequel nous disposons des missions aériennes de 1991 et 1996. La lar-

geur de la bande active a été mesurée à intervalles réguliers de 50 m sur un linéaire de 4,45 km, soit un total de 89 mesures par date. Les valeurs moyennes obtenues sont, respectivement pour 1991 et 1996 de 6,17 et 7,40 m. Bien que ces deux valeurs soient en apparence très proches, un test de Mann Whitney montre qu'elles sont significativement différentes ($p = 0,0001$), ce qui tend à confirmer une légère tendance à l'élargissement induite par la crue de 1994. La comparaison des bandes actives effectuée à partir de diagrammes longitudinaux diachroniques (Fig. 33) met en évidence des élargissements ponctuels, très localisés, alors que l'essentiel du linéaire est resté relativement stable. Cet exemple montre que les effets morphologiques des fortes crues récentes se limitent à quelques secteurs sensibles. Il faut cependant considérer une probable sous-estimation des rétractions lorsque celles-ci ont été mesurées à l'aide des photographies de 1996.

Tableau 9

Missions aériennes retenues pour l'analyse de l'évolution des bandes actives

Date	Fournisseur	Echelle	Type
1948	IGN	1 :25 000	noir et blanc
1956	IGN	1 :25 000	noir et blanc
1971	IGN	1 :17 000	infrarouge noir et blanc
1972	IGN	1 :17 000	infrarouge noir et blanc
1991	IFN	1 :18 000	infrarouge fausses couleurs
1996	IGN	1 :25 000	couleurs naturelles

IGN : Institut Géographique National

IFN : Inventaire Forestier National

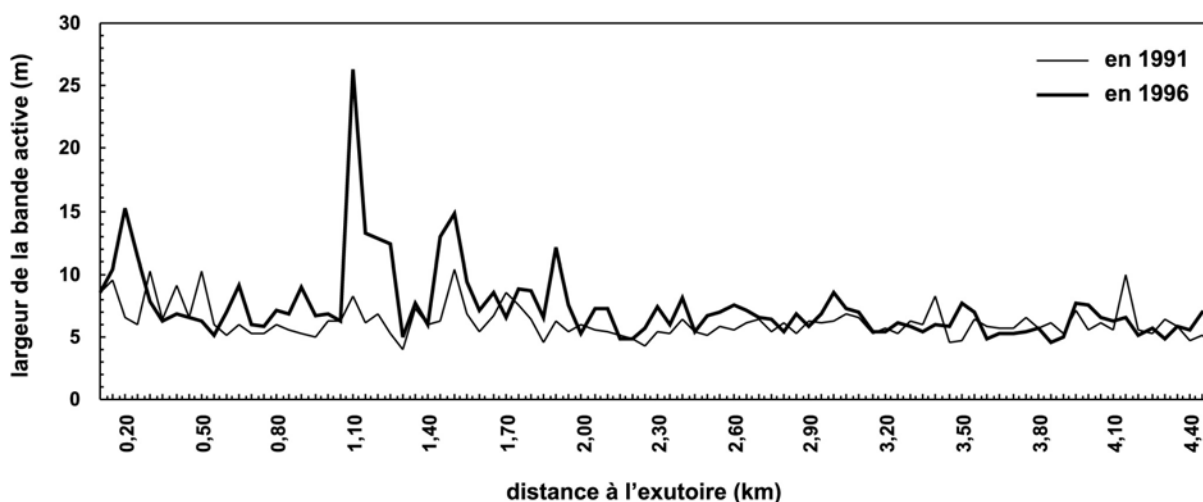


Figure 33

Évolution des largeurs de la bande active du Rieu de Montaulieu entre 1991 et 1996 ; les mesures ont été effectuées à intervalles réguliers de 50 m sur photographies aériennes

La sélection des tronçons de mesure

L'analyse diachronique des bandes actives a fait l'objet d'une double procédure : une première démarche globale conduite sur l'ensemble des 51 affluents d'étude et une seconde démarche plus détaillée mise en œuvre sur 3 couples d'affluents (Esconavette et Barnavette, Bordette et Rieu de Montaulieu, Bine et Soubrion). Ces couples sont constitués de rivières dont les surfaces de bandes actives sont nettement différentes, bien que leurs bassins versants respectifs présentent à première vue de nombreuses similitudes physiographiques (Tableau 10).

Tableau 10
Principales caractéristiques physiques des couples de bassins versants

	Esconavette	Barnavette	Bine	Soubrion	Bordette	Rieu Montaulieu
superficie drainée (km ²)	10	14	17	24	12	13
altitude moyenne (m) ¹	753	754	764	838	571	599
altitude maximale (m) ²	1273	1340	1490	1544	965	965
ratio de relief (m m ⁻¹) ³	0,14	0,13	0,14	0,17	0,07	0,07
densité de drainage (km km ⁻²) ⁴	6,84	5,56	5,52	4,83	5,59	7,21
largeur du fond de vallée (m) ²	320	314	105	107	70	72
ordre ⁵	5	5	5	5	5	5
largeur du lit (m) ⁶	8,42	4,96	4,98	4,32	8,85	5,99
pente du lit (m m ⁻¹) ⁷	0,05	0,04	0,03	0,04	0,02	0,02
D50 (mm) ⁷	34	35	90	91	48	51

1. d'après le MNT BDAIti (résolution de 100 m)

2. d'après les cartes topographiques au 1 : 25 000^{ème}

3. rapport de la dénivellation maximale du bassin versant sur sa longueur d'extension maximale ; mesuré sur les cartes topographiques au 1 : 25 000^{ème}

4. déterminé d'après le modèle de dissection visible sur les cartes topographiques au 1 : 25 000^{ème}

5. déterminé selon la méthode de Strahler [1957] sur les cartes topographiques au 1 : 25 000^{ème}

6. d'après les photographies aériennes de 1991 (1 : 17 000^{ème})

7. d'après les relevés de terrain

L'analyse conduite sur l'ensemble des affluents prend en compte un linéaire délimité depuis l'exutoire jusqu'aux principales confluences amont du réseau hydrographique (Fig. 34). Ce linéaire correspond approximativement aux tronçons d'ordre 4 à 6 (ordre déterminé selon la méthode de Strahler [1957], sur cartes topographiques au 1:25000^{ème}) et il englobe l'ensemble du réseau sur lequel est susceptible de se développer une morphologie de type fluvial. Il a été déterminé en partie à l'aide des photographies aériennes de 1948 et ses limites amont ont été positionnées de façon à englober l'ensemble du linéaire où se développe une bande active suffisamment large pour être visible sur les photos. Il intègre ainsi à la fois les tronçons aval inscrits dans une plaine alluviale et les principales branches torrentielles amont. La longueur des tronçons de mesure s'échelonne entre 3 et 48 km et elle est proportionnelle à la taille du bassin versant (Fig. 35).

Concernant l'analyse conduite sur les couples d'affluents, nous avons effectué les mesures sur les tronçons d'ordre 5 qui correspondent à un linéaire inscrit dans une plaine alluviale et qui possède une capacité d'autoajustement latéral (Fig. 36). La longueur des tronçons de mesure s'échelonne entre 2900 et 6650 m.

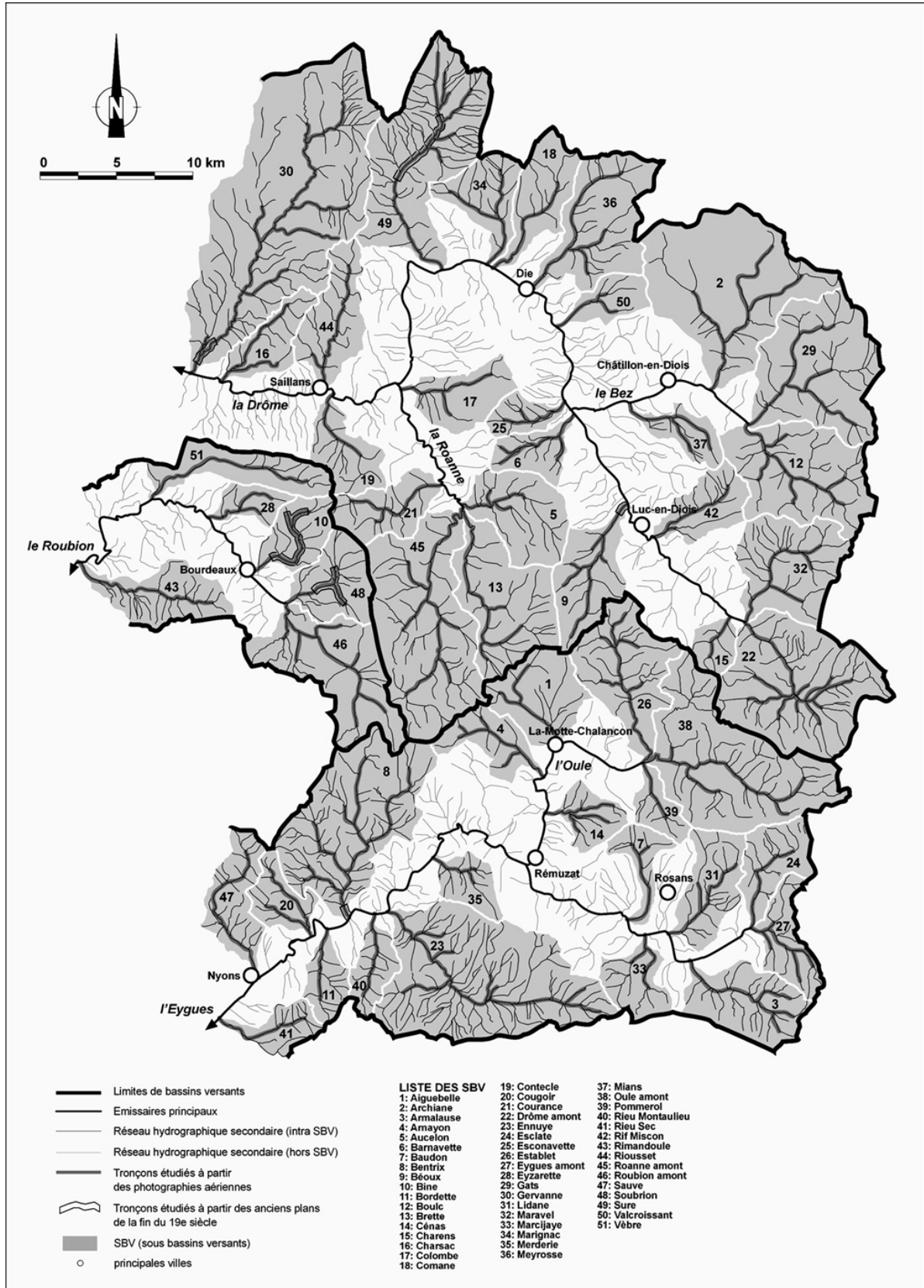


Figure 34
 Localisation des tronçons de mesure sélectionnés pour l'analyse diachronique des bandes actives sur les 51 affluents d'étude

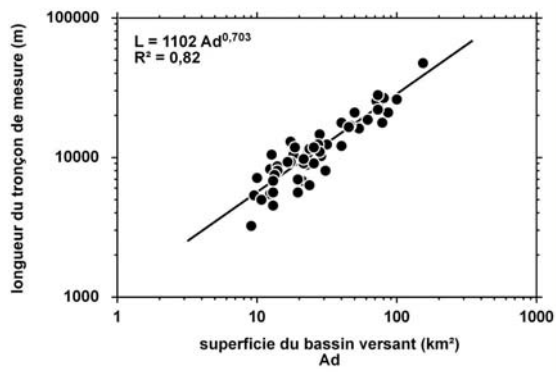


Figure 35
Relation statistique entre la longueur des tronçons de mesure et la superficie des bassins versants

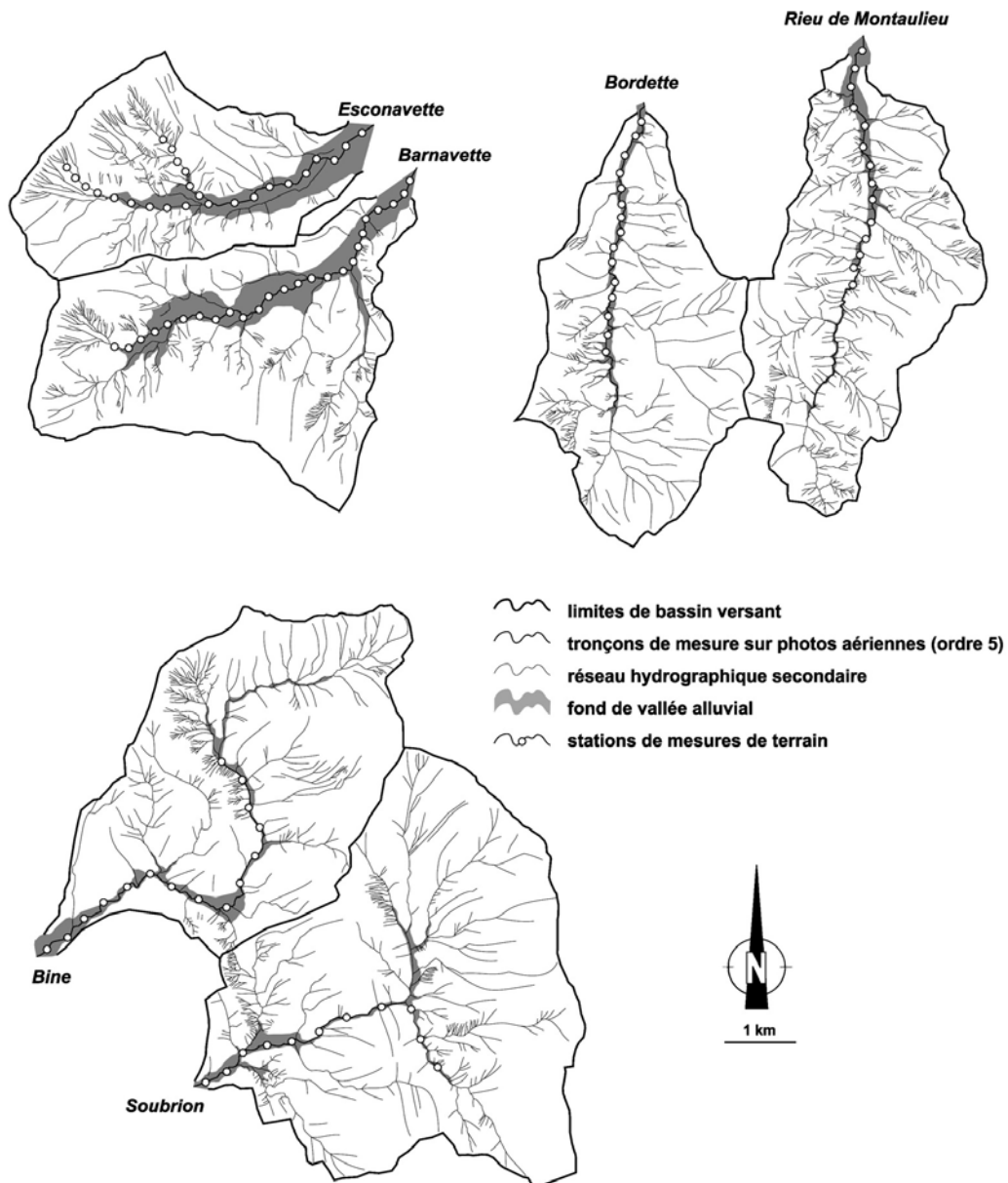


Figure 36
Localisation des tronçons sélectionnés pour l'analyse diachronique des bandes actives sur photographies aériennes et des stations de mesures de terrain sur les 3 couples de bassins versants

Les protocoles de mesure

Les mesures de largeur de bande active ont été réalisées selon deux protocoles distincts : concernant l'analyse globale conduite sur 51 affluents, la largeur moyenne de la bande active est obtenue en faisant le rapport entre la surface de bande active et la longueur du tronçon de mesure ; concernant l'analyse détaillée conduite sur 6 affluents, la largeur de bande active est mesurée à intervalles réguliers de 50 m le long du tronçon de mesure, ce qui permet d'analyser plus finement la variabilité de la mesure et son organisation spatiale.

La mesure des surfaces de bande active sur photographies aériennes exige une démarche méticuleuse lorsque les ruisseaux étudiés sont de petite taille. Elle nécessite l'emploi d'outils particuliers qui permettent d'améliorer la lecture du paysage alluvial. Dans un premier temps, les photographies aériennes ont été scannées selon une résolution élevée de 650 dpi (dpi = unité de résolution d'une image numérique permettant de définir un nombre de pixels par pouce, 1 pouce étant égal à 2,54 cm). L'image ainsi obtenue est ensuite transférée en arrière-plan sur un logiciel de dessin assisté par ordinateur (*Freehand*) et les bandes actives sont digitalisées sur une vue écran selon un agrandissement de 1500 à 2000 %. Cette technique permet d'améliorer la précision du tracé des limites de la bande active.

Au préalable, il convient de déterminer des critères précis d'identification des bandes actives. Plusieurs problèmes peuvent en effet se poser lors de la digitalisation. Les secteurs à bancs de galets mobiles ne sont que très rarement uniformes sur la photo et présentent souvent une texture hétérogène. Ces secteurs sont généralement identifiables par leur teinte claire par rapport à l'environnement immédiat, bien que souvent, il soit difficile de distinguer leur limite lorsqu'ils sont en contact direct avec une route, un chemin ou une zone d'érosion non végétalisée de versant. L'usage de la stéréoscopie, lorsqu'elle est possible, améliore nettement la lecture et le positionnement des limites. D'autre part, les bandes actives sont souvent occupées par une végétation annuelle herbacée qui, lorsqu'elle est suffisamment dense, obscurcit la bande active. Cette végétation annuelle, présente en été et surtout en automne mais absente en hiver, n'est pas considérée comme un signe de stabilisation et d'abandon du banc de galets ; de fait, ces unités ont été incluses dans la bande active. Il apparaît également que certaines portions du lit sont parfois colonisées par des îlots de végétation arbustive, souvent constitués de fourrés de saules ou de peupliers noirs. Ces îlots de végétation constituent les premiers signes de stabilisation des bancs et doivent être exclus de la bande active. Ils correspondent aux stades pionniers ou post-pionniers de la succession végétale.

L'effet de masquage de la ligne de berge par la forêt alluviale constitue également une source d'imprécision importante. Il apparaît en effet que les limites du lit actif ne sont jamais rectilignes et présentent le plus souvent un aspect moutonné lié à la configuration de la canopée. Il convient donc d'extrapoler la ligne de berge en lissant la démarcation de façon à être plus proche de la réalité. Cette technique de dessin conduit à diminuer la marge d'erreur liée à cet effet de masquage.

Une fois la bande active digitalisée, il faut mesurer sa surface. Nous avons utilisé pour cela un logiciel de traitement d'image (*Photoshop*) permettant de comptabiliser le nombre de pixels d'une couleur donnée sur une image raster. Le fichier vecteur issu de la digitalisation de la bande active (représentée en noir sur un fond blanc) est donc exporté en format EPS (image raster) selon une résolution de 900 dpi. Le choix d'une telle résolution a été déterminé suite à un test de précision des mesures de surface en fonction de différentes résolutions réalisé sur 4 cours d'eau (Fig. 37). A l'issue de ce test, il apparaît que la mesure de surface décroît avec l'augmentation de la résolution jusqu'à un seuil au delà duquel la surface reste stable. Ce seuil est compris entre 700 et 1000 dpi. Nous avons retenu la valeur de 900 dpi comme un bon compromis entre notre besoin de précision, dépendant notamment de la taille des cours d'eau concernés, et la taille du fichier image à traiter.

Les surfaces sont ensuite mesurées à l'aide de la formule suivante :

$$S = NP \times SUP$$

avec S = surface (cm^2)
 NP = nombre de pixels
 SUP = surface unitaire du pixel (cm^2)

Sachant que 1 pouce = 2,54 cm et que nous utilisons une résolution de 900 dpi, la surface unitaire du pixel se calcule de la façon suivante :

$$SUP = \left(\frac{2,54}{900} \right)^2$$

Pour convertir cette surface mesurée en m^2 , il suffit de mesurer l'échelle de la photographie utilisée. Celle-ci a été mesurée selon un axe parallèle au tracé du cours d'eau, en utilisant les clichés sur lesquelles les tronçons de mesure étaient les mieux centrés.

Les mesures de la largeur de la bande active conduites sur les 6 affluents ont également été réalisées à partir de photographies aériennes scannées selon une haute résolution, de façon à pouvoir effectuer des agrandissements du fond de vallée. L'image obtenue est ensuite géoréférencée en coordonnées non-terrestres à l'aide du logiciel *Mapinfo*, après calcul de l'échelle moyenne du fond de vallée. Après digitalisation du linéaire d'observation, les points de mesure, équidistants de 50 m, sont positionnés automatiquement à l'aide du programme *distance-marker*. Les largeurs sont ensuite mesurées avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre (ce qui correspond à une largeur réelle comprise entre 1,5 et 3 m en fonction de l'échelle des photographies aériennes utilisées).

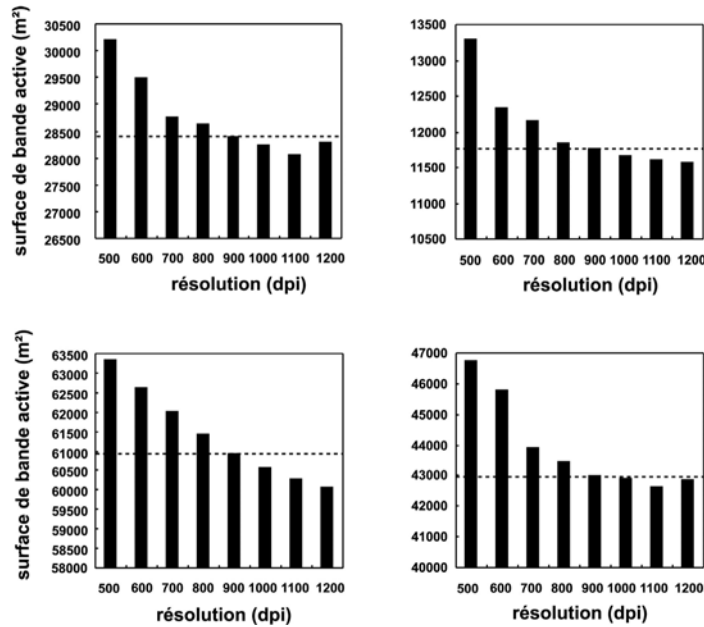


Figure 37

Effet de la résolution de l'image raster (en dpi) sur la mesure de la surface de bande active ; test effectué sur 4 rivières, permettant d'identifier le seuil de résolution à adopter (900 dpi)

Évaluation des erreurs de mesure

La surface de bande active mesurée sur photographies aériennes diffère de la surface réelle Cette différence est liée aux sources d'erreur suivantes :

- La distorsion des photographies aériennes.

Les photographies aériennes présentent l'inconvénient de déformer la surface couverte. Cette distorsion est maximum sur les bords de la photo et négligeable au centre du cliché. D'autre part, l'échelle est variable en fonction de l'altitude du terrain. Afin de minimiser cette source d'erreur, il convient généralement de recalcr les photos à l'aide de logiciels prévus à cet effet. Ce recalage est une opération très longue. On estime qu'un opérateur expérimenté recalcr en moyenne 5 photos par jour. Nous avons utilisé plus de 600 photos pour cette étude. Il n'était donc pas envisageable de procéder au recalage.

- L'effet de masquage de la ligne de berge par la végétation.
- La photointerprétation.

La surface de bande active mesurée sera légèrement différente en fonction de l'opérateur effectuant la digitalisation. Afin de réduire cette source d'erreur, il convient d'adopter des critères précis concernant la délimitation des bandes actives.

Nous avons effectué plusieurs tests dont l'objectif fut d'évaluer la marge d'erreur de notre protocole de mesure. La comparaison des surfaces de bandes actives obtenues à partir de photographies aériennes recalées et non recalées montre une différence de 11 %. Ce test a été effectué à partir des

photographies aériennes de 1956 sur le ruisseau de la Bine. Les surfaces de bande active sur photos recalées et non recalées sont respectivement de 62 124 et de 69 231 m², soit une différence de 7107 m².

Nous avons ensuite comparé un ensemble de mesures de largeur de bande active sur photos non recalées avec des mesures effectuées sur le terrain. L'objectif fut d'évaluer la marge d'erreur globale de la technique de mesure. Ce test a été effectué sur trois cours d'eau : la Bordette, le Rieu de Montaulieu et la Haute-Drôme. Il est basé sur 58 comparaisons (Tableau 11). Les mesures de terrain ont été effectuées en mars 1998 sur le Rieu de Montaulieu et la Bordette et en septembre 2001 sur la Haute-Drôme. Nous avons localisé chaque station de mesure à l'aide d'un topofil permettant de connaître précisément la distance parcourue depuis l'exutoire, ce qui nous a permis de pointer chaque station sur les photographies aériennes. Les photos de 1996 ont été utilisées pour les mesures sur cliché (échelle 1:25000^{ème}). Ces trois cours d'eau n'ayant pas subi de grandes crues sur les périodes considérées, nous pouvons admettre que les bandes actives sont restées stables entre les différentes dates. On peut cependant s'attendre à une végétalisation du lit sur la Haute-Drôme entre 1996 et 2001 qui viendrait fausser légèrement les comparaisons. Cet effet de sous-estimation des différences de largeur a pu jouer localement mais il reste globalement faible. Sur 30 sites étudiés, seuls 4 montrent une diminution substantielle de largeur entre 1996 et 2001 (Tab. 11).

En valeur absolue, la différence moyenne entre les largeurs mesurées sur le terrain et celles mesurées sur photos, est de 2,39 m +/- 1,99 m. La distribution des erreurs est de type logarithmique (Fig. 38A) ; 90 % des valeurs obtenues sont inférieures à 5,20 m ; 75% sont inférieures à 3,21 m. Nous pouvons également noter que généralement, les largeurs mesurées sur photo sont inférieures à celles mesurées sur le terrain, ce qui confirme l'effet de masquage de la végétation (Fig. 38B). Cet effet peut atteindre en valeur maximale 9 mètres de large, mais il est possible que cette valeur obtenue sur la Haute-Drôme intègre également une végétalisation du lit entre 1996 et 2001. La marge d'erreur globale est de 18 %. Ces résultats nous conduisent à considérer comme significative toute différence de largeur supérieure à 3,50 m entre 2 dates. Cette marge d'erreur est nettement inférieure à celles communément admises pour les mesures sur photographies aériennes, qui sont généralement comprises entre 5 et 25 mètres [Surian, 1999; Winterbottom, 2000; Sloan *et al.*, 2001]. Il faut également signaler que cette marge d'erreur dépend de l'échelle de la photographie aérienne. Plus cette échelle est petite et plus l'erreur est importante. L'échelle des photos de 1996 étant la plus petite de toutes celles utilisées (Tab. 9), on peut considérer la marge d'erreur obtenue comme une valeur maximale valable pour toutes les missions utilisées.

Tableau 11

Comparaison des mesures de largeur de bande active effectuées sur photographies aériennes non-recalées et sur le terrain. Test effectué sur la Bordette, le Rieu de Montaulieu et la Haute-Drôme

cours d'eau	station	PK	WT : Largeur terrain (m)	WP : Largeur photo (m)	WT-WP (m)
Haute-Drôme	1	86,38	10,90	8,70	2,20
Haute-Drôme	2	86,46	8,80	8,00	0,80
Haute-Drôme	3	86,66	7,50	7,00	0,50
Haute-Drôme	4	86,75	7,10	8,10	-1,00
Haute-Drôme	5	87,61	7,50	8,55	-1,05
Haute-Drôme	6	87,79	11,45	6,40	5,05
Haute-Drôme	7	88,00	8,50	8,00	0,50
Haute-Drôme	8	88,19	7,00	8,21	-1,21
Haute-Drôme	9	88,39	12,00	9,54	2,46
Haute-Drôme	10	88,66	12,00	12,23	-0,23
Haute-Drôme	11	88,82	11,00	9,59	1,41
Haute-Drôme	12	88,99	10,50	8,66	1,84
Haute-Drôme	13	89,31	7,50	5,95	1,55
Haute-Drôme	14	89,48	8,00	5,50	2,50
Haute-Drôme	15	90,12	11,90	10,20	1,70
Haute-Drôme	16	90,27	41,00	38,60	2,40
Haute-Drôme	17	90,58	30,50	39,70	-9,20
Haute-Drôme	18	90,71	29,50	26,50	3,00
Haute-Drôme	19	90,99	24,60	25,40	-0,80
Haute-Drôme	20	91,31	12,30	13,00	-0,70
Haute-Drôme	21	91,52	22,10	26,20	-4,10
Haute-Drôme	22	91,70	27,50	22,50	5,00
Haute-Drôme	23	91,90	19,90	24,30	-4,40
Haute-Drôme	24	92,10	24,90	16,00	8,90
Haute-Drôme	25	92,29	10,40	15,80	-5,40
Haute-Drôme	26	92,44	31,30	32,20	-0,90
Haute-Drôme	27	92,70	27,10	29,70	-2,60
Haute-Drôme	28	92,85	34,10	31,30	2,80
Haute-Drôme	29	93,09	31,70	35,30	-3,60
Haute-Drôme	30	93,29	21,60	19,20	2,40
Bordette	1	0,30	9,59	8,00	1,59
Bordette	2	0,42	11,56	15,00	-3,44
Bordette	3	0,75	20,00	20,25	-0,25
Bordette	4	1,03	18,86	16,00	2,86
Bordette	5	1,40	10,50	8,00	2,50
Bordette	6	1,49	4,97	3,25	1,72
Bordette	7	1,67	9,71	6,50	3,21
Bordette	8	1,97	6,84	8,75	-1,91
Bordette	9	2,26	8,56	7,75	0,81
Bordette	10	2,55	9,78	3,75	6,03
Bordette	11	2,83	10,60	7,75	2,85
Bordette	12	3,20	7,64	4,25	3,39
Bordette	13	3,45	7,93	7,25	0,68
Bordette	14	3,75	5,68	5,25	0,43
Bordette	15	4,05	5,34	4,22	1,12
Rieu Montaulieu	1	0,16	8,46	9,36	-0,90
Rieu Montaulieu	2	0,45	8,68	6,90	1,78
Rieu Montaulieu	3	0,75	8,36	8,13	0,23
Rieu Montaulieu	4	1,08	15,83	16,51	-0,68
Rieu Montaulieu	5	1,35	10,95	5,67	5,28
Rieu Montaulieu	6	1,75	11,50	12,32	-0,82
Rieu Montaulieu	7	2,11	7,47	6,65	0,82
Rieu Montaulieu	8	2,31	5,41	7,14	-1,73
Rieu Montaulieu	9	2,56	6,95	8,13	-1,18
Rieu Montaulieu	10	3,06	5,62	6,40	-0,78
Rieu Montaulieu	11	3,19	9,71	4,19	5,52
Rieu Montaulieu	12	3,45	3,59	8,13	-4,54
Rieu Montaulieu	14	4,34	4,67	6,16	-1,49

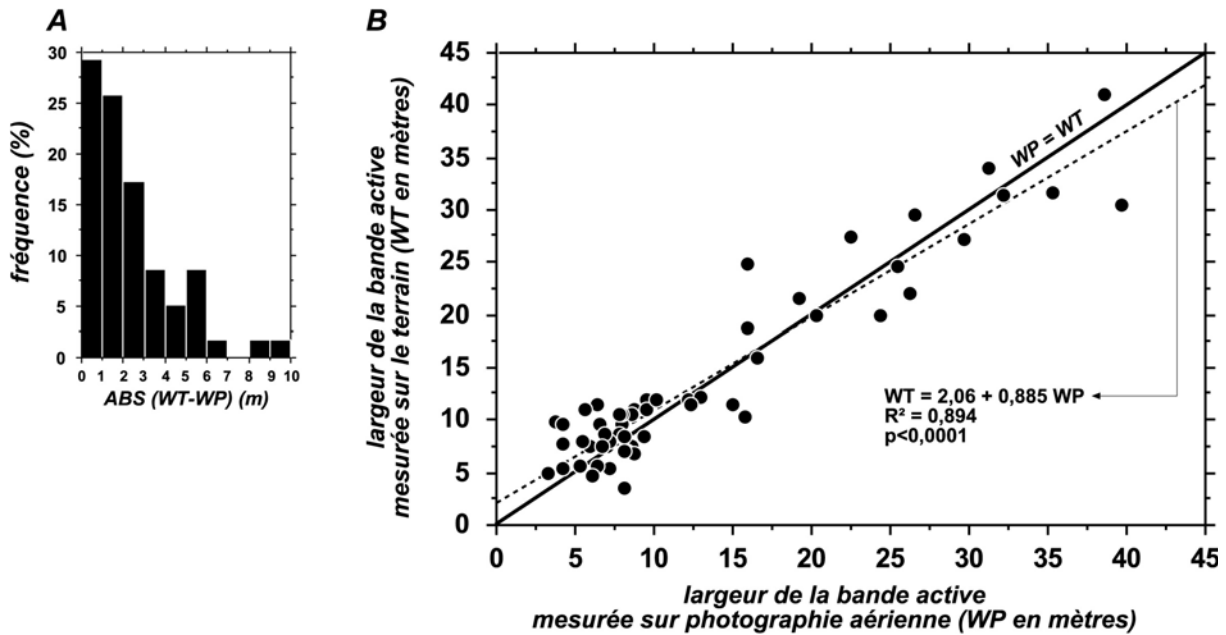


Figure 38

Comparaison des largeurs de bande active mesurées sur photographies aériennes (1/25 000ème) et sur le terrain ; A : distribution de l'erreur de mesure (en valeur absolue) ; B : relation statistique entre les largeurs mesurées sur photos et sur le terrain

1.1.2. Relevés de terrain des formes fluviales résiduelles

La rétraction et l'incision des lits actifs transforme progressivement la composition des fonds de vallée. L'enfoncement du profil en long, lorsqu'il n'affecte pas l'ensemble de la surface du lit actif, engendre la formation de nouveaux niveaux topographiques surélevés par rapport au fond du lit en cours d'incision ; ces niveaux sont constitués par les portions de l'ancienne bande active en cours de déconnexion. Le processus de rétraction implique nécessairement la transformation d'anciennes portions de la bande active qui vont être converties en plaine alluviale ou en basses terrasses en fonction du degré d'abandon. Nous les qualifierons de formes résiduelles.

Différentes mesures de terrain ont été conduites afin de caractériser la nature et l'âge de ces formes. Ces mesures rassemblent à la fois des opérations de levés topographiques et des procédures de datation radiochimiques et dendrochronologiques.

1.1.2.1. Les relevés topographiques

De nombreux profils en travers ont été levés en altitudes relatives de façon à connaître l'agencement des différents niveaux topographiques qui constituent le fond de vallée des affluents. Ces relevés nous permettent, après identification des anciennes surfaces actives visibles sur les photographies aériennes de 1948, de mesurer la différence d'altitude entre le fond du lit actuel et ces surfaces. Ils ont toujours été précédés par une reconnaissance de terrain de façon à localiser les éventuels ouvrages de contrôle du profil en long et à identifier les secteurs les plus représentatifs pour l'étude du

changement fluvial. Sur certains sites, les levés ont été complétés par une série de sondages à la tarière de façon à détecter la présence de sédiments fins en surface et de connaître leur épaisseur. Cette opération permet d'évaluer qualitativement l'inondabilité des formes résiduelles et apporte des informations sur les processus impliqués dans leur formation. Quelques descriptions de la végétation présente sur ces surfaces ont procuré également des éléments supplémentaires de compréhension des dynamiques morphologiques. La détermination des espèces présentes et de leurs principales exigences en terme de biotope permet d'apprécier les conditions écologiques qui prévalaient lors de leur installation.

Les relevés topographiques ont été conduits selon différents protocoles d'échantillonnage. Les 51 affluents ont fait l'objet d'un levé de profil en travers sur une station jugée représentative de la morphologie dominante du cours inférieur. Sur les 6 affluents étudiés en détail, les profils ont été levés à intervalles réguliers (de 250 à 500 m) le long du cours principal afin de connaître la variabilité longitudinale de l'incision (Fig. 36). Quelques profils complémentaires de fond de vallée ont également été réalisés sur certains sites jugés intéressants du fait de la présence de différents niveaux topographiques bien individualisés et du bon état de conservation des formes résiduelles récentes et de leurs formations végétales.

Les levés topographiques ont été effectués par nivellement (niveau *Wild Heerbrugg NA20*). La précision des mesures altitudinales est de l'ordre de 0,5 cm. Les mesures de distance ont souvent été réalisées à l'aide d'un ruban de 50 mètres tendu le long du profil.

1.1.2.2. Les techniques de datation

La dendrochronologie

La datation dendrochronologique est basée sur le dénombrement des cernes de croissance annuels des espèces ligneuses. Elle est souvent associée aux travaux de géomorphologie fluviale car elle permet de dater la végétation présente sur les différents niveaux topographiques récents du fond de vallée, et donc d'évaluer l'âge de la surface [Everitt, 1968 ; Nakamura *et al.*, 1995 ; Friedman *et al.*, 1996a ; Piégay et Salvador, 1997 ; Marutani *et al.*, 1999].

Nous avons conduit plusieurs échantillonnages dendrochronologiques. Les principaux objectifs visés furent de (1) déterminer la chronologie de l'installation forestière dans le fond de vallée des affluents et (2) d'analyser la variabilité spatiale de cette chronologie, celle-ci pouvant s'exprimer latéralement en fonction des différents niveaux de terrasses, ou longitudinalement en fonction d'une éventuelle progression vers l'aval ou vers l'amont de la colonisation végétale des bandes actives.

Plusieurs sites ont été sélectionnés en fonction de ces objectifs (Fig. 39). Les sites étudiés sur les rivières Archiane, Rif Miscon, Béoux et Barnavette ont permis d'établir des comparaisons entre les différents niveaux topographiques répertoriés. Les mesures dendrochronologiques ont été complé-

tées par des levés de profils en travers de la plaine moderne. Les arbres échantillonnés sont au nombre de 10 à 20 par niveaux topographiques. Nous avons sélectionné les espèces pionnières (*Pinus sylvestris*, *Populus nigra*, *Salix eleagnos*, *Alnus incana*) qui semblaient être les plus âgées, à savoir les individus à gros diamètre, bien que ce critère ne soit pas toujours révélateur de l'âge chez certaines espèces comme le pin sylvestre.

Plusieurs sites ont été sélectionnés de façon à établir une comparaison de l'installation forestière sur le gradient amont-aval (Esconavette, Barnavette, Soubrion et Sure). Les sites ont été localisés au niveau des secteurs qui se sont fortement rétractés entre 1948 et aujourd'hui et qui présentent un bon état de conservation du corridor forestier, de façon à disposer d'un échantillon suffisamment important pour établir des comparaisons. Les échantillons se composent de 10 à 30 individus par site, en fonction du nombre plus ou moins important d'arbres âgés présents sur la surface à étudier. Ces mesures ont parfois été accompagnées d'un levé de profil en travers et de sondages de surface visant à connaître l'épaisseur des sédiments fins.

Les différents sites étudiés sur la rivière Sure ont fait l'objet d'un travail en collaboration avec Mohamed Ali Fredj et Laurent Astrade (*Université Joseph Fourier Grenoble*) et doivent également être présentés de manière plus détaillée dans un mémoire de maîtrise.

Les arbres ont été carottés à l'aide d'une sonde de Pressler à 1,3 mètres du sol selon la procédure standard. Les carottes ont été tranchées au cutter ou poncées de façon à améliorer la lecture des cernes de croissance.

Les radioéléments Plomb 210 (^{210}Pb) et Césium 137 (^{137}Cs)

En complément des datations dendrochronologiques, deux profils d'activité des radioéléments ^{210}Pb et ^{137}Cs ont été étudiés sur les basses terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette. Les mesures radiochimiques par spectrométrie gamma ont été réalisées par Michel Pourchet du Laboratoire de Glaciologie et de Géophysique de l'Environnement de Grenoble (LGGE).

Le ^{210}Pb et le ^{137}Cs contenus dans les sédiments fins constituent des marqueurs chronologiques abondamment utilisés pour dater les dépôts récents (échelle de temps séculaire) et estimer les taux de sédimentation. Leur application en géomorphologie fluviale concerne essentiellement la mesure des taux de sédimentation dans les plaines alluviales [Foster *et al.*, 1996 ; He et Walling, 1996 ; Walling *et al.*, 1997] et l'identification des zones d'érosion et de dépôts des sédiments [Walling et He, 1997 ; Valero-Garcès *et al.*, 1999 ; Bonniwell *et al.*, 1999].

Le ^{210}Pb , radioélément d'origine naturel, présente une demi-vie de 22 ans. Il est issu de l'uranium 238 qui donne, par filiation radioactive, du radon 222, gaz qui se diffuse dans l'atmosphère et se transforme progressivement en ^{210}Pb . Ce plomb est ensuite réincorporé dans le sol lors des précipitations et les retombées atmosphériques de ^{210}Pb sont considérées comme constantes dans le temps. Le ^{210}Pb présent dans le sol se compose ainsi d'une fraction d'origine atmosphérique, appe-

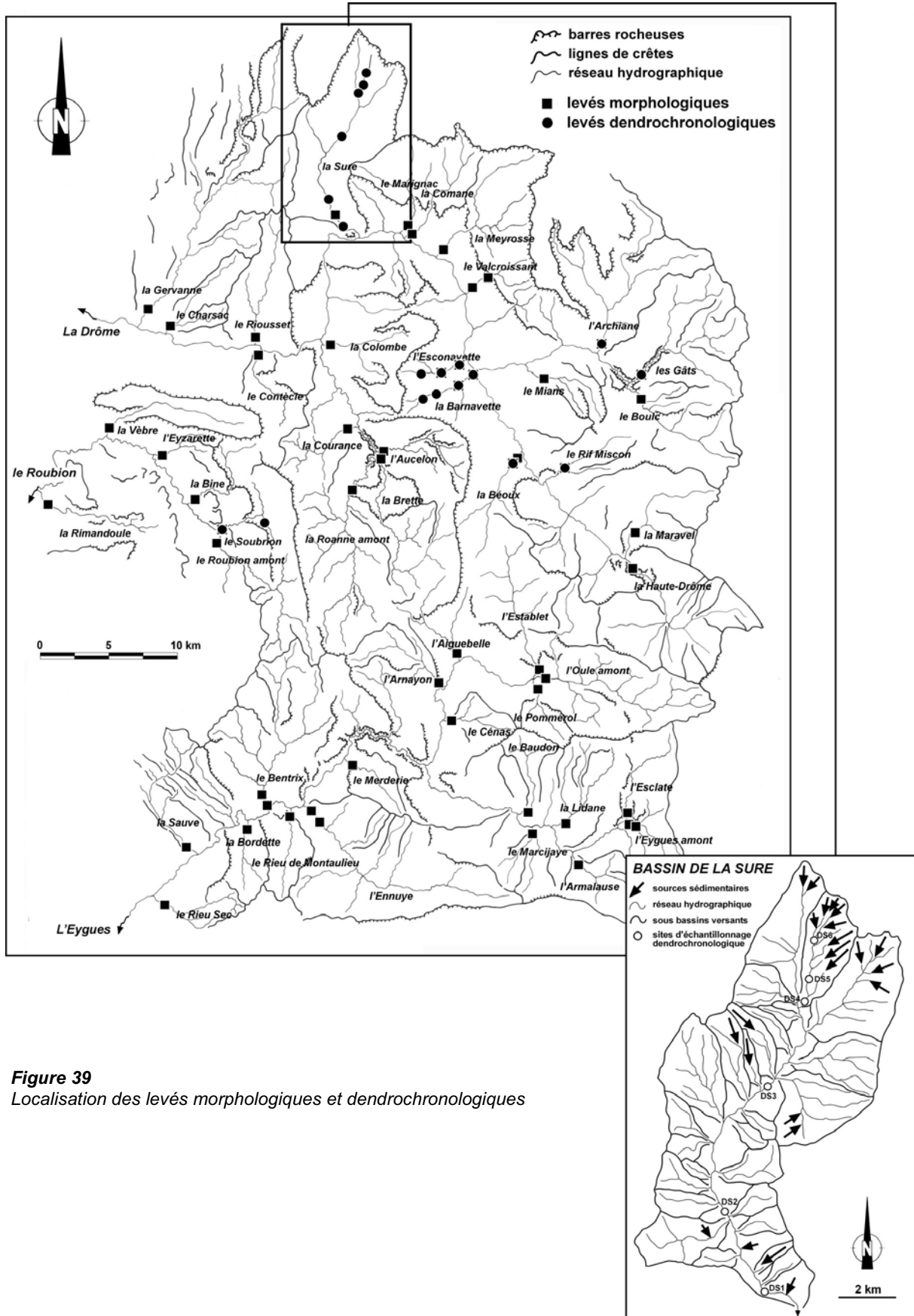


Figure 39
Localisation des levés morphologiques et dendrochronologiques

lée plomb non-supporté, et d'une fraction produite dans le sol par désintégration des radioéléments parents de l'uranium 238, appelée plomb supporté. La datation des sédiments s'effectue à partir du plomb non-supporté et elle est basée sur une formule dérivée de la loi de désintégration du ^{210}Pb [Wise, 1980] :

$$C_t = C_0 e^{-\lambda t}$$

avec C_t : concentration du ^{210}Pb au temps t

C_0 : concentration initiale du ^{210}Pb (concentration en surface)

λ : constante de désintégration = 0,03114

Le ^{137}Cs est un radionucléide d'origine artificielle, produit de la fission nucléaire, dont la période est de 30 ans. Sa présence dans le sol est directement liée aux retombées atmosphériques faisant suite aux grandes périodes d'essais nucléaires des années 1950 et 1960 (avec un pic marqué en 1963) et à l'accident nucléaire de Tchernobyl de 1986. Les couches sédimentaires qui se trouvaient en surface lors des périodes d'abondantes retombées atmosphériques ont alors stocké de grandes quantités de césium. Si la sédimentation s'est poursuivie après ces événements, les couches contaminées vont se retrouver progressivement enterrées et un simple profil d'activité du césium dans le sol permettra de retrouver ces niveaux marqueurs et de mesurer ainsi l'épaisseur de sédiments accumulés depuis.

Deux profils d'activité du ^{210}Pb et du ^{137}Cs ont été réalisés sur les basses terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette, reconnues comme d'anciennes portions du lit actif visible sur les photographies aériennes de 1948. L'objectif des mesures fut de déterminer la période à partir de laquelle cesse la remobilisation en surface de cette bande active. Les sédiments, constitués de nappes caillouteuses à matrice fine, ont été prélevés selon une surface d'échantillonnage constante de 400 cm², sur une profondeur de 40 cm. Le prélèvement a été effectué par décapage superficiel progressif au pinceau, de façon à récupérer soigneusement la matrice fine contenue entre les particules grossières. Les sédiments prélevés par couches de 2 cm d'épaisseur ont été ensuite séchés en étuves et tamisés de façon à extraire la fraction inférieure à 1 mm de diamètre. Cette fraction a ensuite été transmise au LGGE pour les mesures radiochimiques. Une description détaillée de la technique de mesure est présentée dans Pourchet *et al.* [1989].

1.2. La rétraction des bandes actives

1.2.1. Les tendances générales d'évolution

1.2.1.1. La période 1948-1991(96)

La période 1948-1991(96) est marquée par une très nette tendance à la rétraction des bandes actives (Fig. 40). La largeur moyenne des 51 cours d'eau étudiés à partir des photographies aériennes est passée de 11,5 mètres en 1948 à 4,6 mètres en 1991(96). Les intervalles de confiance de ces valeurs, calculés à partir d'un test T univarié, confirment statistiquement la tendance (Tab. 12). La courbe d'évolution des largeurs moyennes suggère un ajustement morphologique de type exponentiel, avec une rétraction forte dans les années 1950 et 1960 et une atténuation de l'ajustement à partir des années 1970 (Fig. 40A). La distribution des largeurs moyennes aux différentes dates montre bien l'occurrence d'un changement majeur entre 1956 et 1971(72) (Fig. 40B). Ces observations sont confirmées par une ANOVA dont l'objectif a été de tester les différences de largeur en fonction du temps (Tab. 13). Le test a posteriori de Scheffé montre que les changements se produisent essentiellement entre 1956 et 1971, tandis que les périodes 1948-1956 et 1971(72)-1991(96) ne dévoilent pas de différences significatives. Ces résultats mettent en évidence une contraction majeure des bandes actives, qui se produit de façon accélérée dans les années 1950 et 1960.

Cette évolution se caractérise également par un changement des distributions statistiques. L'étendue des largeurs moyennes est nettement plus faible aujourd'hui que ce qu'elle était il y a 50 ans (Fig. 40B). Ceci s'explique essentiellement par la disparition des fortes valeurs. La variabilité des largeurs entre les cours d'eau est passée par une phase d'augmentation entre 1956 et 1971(72), puis par une phase de diminution entre 1971(72) et 1991(96) (Tab. 12). Ceci peut s'interpréter comme le rétablissement progressif d'une situation d'équilibre dynamique sur la plupart des affluents, après une courte période de changement au cours de laquelle ont coexisté des cours d'eau en états d'ajustement différenciés.

Il apparaît ainsi que les bandes actives ont perdu en moyenne 7 mètres en largeur durant les 50 dernières années au profit de la végétation alluviale. Si nous multiplions cette valeur par la longueur totale du réseau hydrographique étudié, nous obtenons une surface de colonisation végétale récente de 454 ha pour l'ensemble des principaux affluents en question. En valeur relative, la rétraction présente un taux moyen de 55 %, ce qui signifie que 55 % des surfaces alluviales actives de 1948 se sont stabilisées entre la fin des années 1940 et aujourd'hui. Nous pouvons donc parler ici d'une véritable biométamorphose, à savoir une explosion récente de la végétation de fond de vallée ayant pour conséquence la stabilisation de grandes étendues d'alluvions grossière. Cette dynamique est à l'origine de nouveaux paysages alluviaux, caractérisés par des lits actifs étroits qui serpentent au sein de jeunes corridors boisés (Fig. 41).

Tableau 12

Indicateurs statistiques de l'évolution des bandes actives sur la période 1948-1991(96) ; valeurs calculées sur les 51 affluents d'étude, excepté pour les largeurs de 1956 qui n'ont été étudiées que sur 40 affluents

	moyenne	intervalle de confiance (95%)*	écart type	coefficient de variation (%)	maximum	minimum
W48 (m)	11,47	[9,46 ; 13,49]	7,16	62,40	32,35	1,50
W56 (m)	9,92	[7,73 ; 12,10]	6,83	68,85	26,97	1,50
W71-72 (m)	6,01	[4,65 ; 7,36]	4,81	80,03	20,93	1,50
W91-96 (m)	4,65	[3,80 ; 5,50]	3,00	64,70	12,67	1,50
TR48-91(96) (%)	55,14	[49,82 ; 60,47]	18,93	34,30	88,09	0,00

W : largeur de la bande active à la date mentionnée

TR : taux de rétraction sur la période mentionnée

* déterminé à partir d'un test T sur échantillons non-appariés

Tableau 13

Résultats du test de Scheffé conduit sur les largeurs moyennes mesurées à différentes dates sur les 51 affluents d'étude

	W48	W56	W71-72	W91-96
W48		0,6341	< 0,0001	< 0,0001
W56			0,0145	< 0,0001
W71-72				0,6878

En gras : différence significative de moyenne (niveau de confiance de 95%)

W : largeur de bande active à la date mentionnée

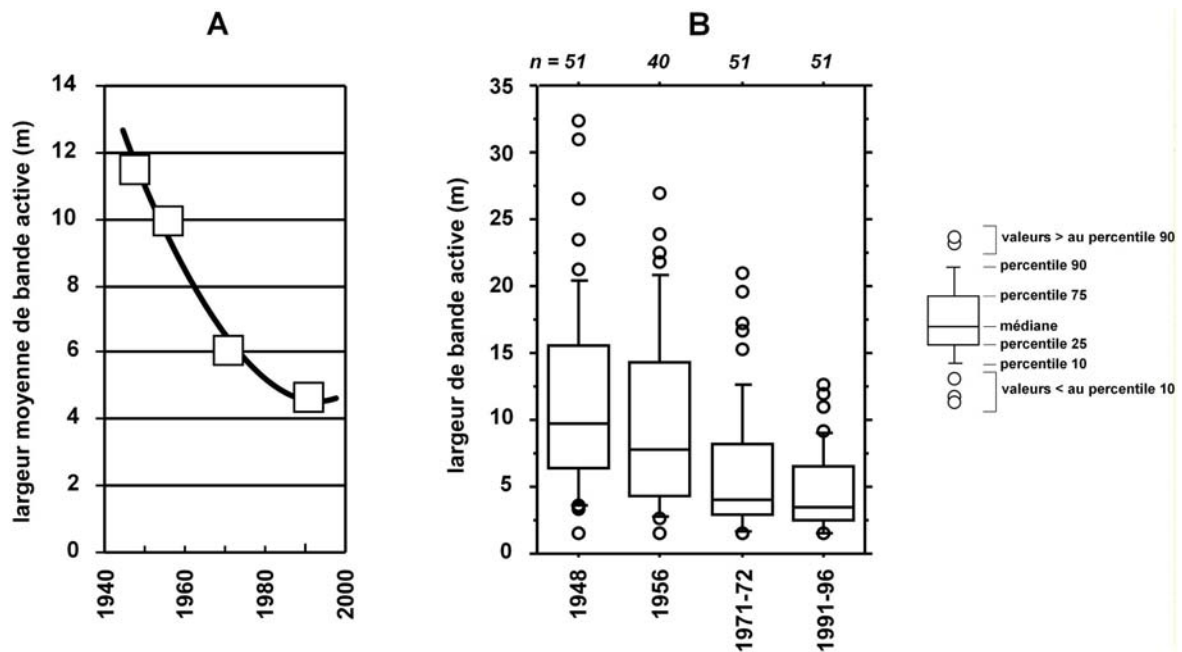


Figure 40

Les largeurs de la bande active des 51 affluents étudiés sur la période 1948-1991(96) ; A : évolution de la largeur moyenne ; B : la distribution des largeurs moyennes aux différentes dates (n : nombre d'observations)



Figure 41

Exemple d'une ancienne bande active, identifiée comme telle sur les photographies aériennes de 1948 et aujourd'hui occupée par la végétation alluviale ; Ruisseau de l'Esconavette, septembre 2002 (cliché Philippe Belleudy)

Sur 51 cours d'eau étudiés, 35 présentent une rétraction significative de leur bande active compte tenu de la marge d'erreur retenue, ce qui représente un pourcentage de 69 % (Fig. 42). Sur les 16 cours d'eau restant, 14 se caractérisent par une tendance à la rétraction mais celle-ci présente une valeur absolue trop faible pour être établie de façon indiscutable à l'aide des photographies aériennes (Archiane, Aucelon, Baudon, Béoux, Charens, Colombe, Drôme amont, Eygues amont, Maravel, Meyrosse, Oule amont, Soubriou, Valcroissant, Vèbre). Exceptés la Béoux, la Drôme amont et l'Eygues amont, ces cours d'eau sont tous caractérisés par une bande active déjà étroite en 1948 (inférieure à 6,5 m), ce qui explique leur faible colonisation végétale sur les 50 dernières années.

On dénombre enfin 2 affluents caractérisés par une bande active stable en apparence : la Comane et le Contècle. Sur les photographies aériennes de 1948, la totalité de leur linéaire hydrographique est déjà masqué par la végétation.

Les différentes courbes d'évolution (Fig. 42) montrent que sur certaines rivières, l'origine de la rétraction accélérée est postérieure à 1956. L'ajustement se produit donc rapidement sur une courte période de 15-20 ans. Tel est le cas de l'Arnayon, de la Barnavette, du Bentrux, de la Béoux, de la Bine, de la Bordette, du Ruisseau de Boulc, du Cougoir, de l'Esconavette, des Gats et de la Sauve. Sur les autres rivières, l'ajustement démarre probablement avant 1948 et les photographies aériennes ne nous permettent pas de repérer l'origine du phénomène.

Plusieurs cas particuliers sont à signaler. La Haute-Drôme présente une bande active relativement stable sur la période 1948-1991 (Fig. 43). La bande active s'élargit entre 1948 et 1956, puis se rétracte entre 1956 et 1972. Cette légère fluctuation géométrique se différencie des tendances mises en évidence sur les autres cours d'eau, dans la mesure où aucune rétraction significative n'est observée au global. La Haute-Drôme se caractérise plutôt par une situation en équilibre dynamique. La largeur de la bande active fluctue autour d'une valeur moyenne qui s'équilibre au cours des 50 dernières années. Certains cours d'eau s'élargissent à partir de 1972. Tel est le cas du Rioussat qui enregistre un accroissement relatif de 165 % entre 1972 et 1991. Enfin, l'Ennyue présente une courbe d'évolution originale dans la mesure où sa bande active est restée stable sur la période 1956-1972.

La rétraction s'opère entre 1948 et 1956 et entre 1972 et 1996.

Les changements de largeur observés sur les 3 couples de bassins versants étudiés en détail sont présentés en Figure 44. Les 6 cours d'eau se caractérisent par une rétraction significative de leur bande active, qui se produit généralement entre 1948 et 1971-72. L'Esconavette et la Bordette se distinguent par une évolution légèrement décalée, qui ne démarre qu'à partir de 1956. Bien que les tendances d'évolution soient similaires et que les différences de largeur s'estompent sur la période, chaque couple comprend un cours d'eau qui arrive à maintenir une bande active plus large au cours du temps. L'Esconavette, la Bordette et la Bine sont respectivement plus larges que la Barnavette, le Rieu de Montaulieu et le Soubriou, alors que les superficies drainées sont très proches. Ces différences seront mises en relation avec une analyse détaillée des sources sédimentaires, de façon à tester l'hypothèse d'un ajustement différencié en fonction du potentiel de recharge sédimentaire de chaque bassin versant.

Figure 42

Evolution des largeurs de la bande active sur chacun des 51 cours d'eau d'étude pour la période 1948-1991 (96)

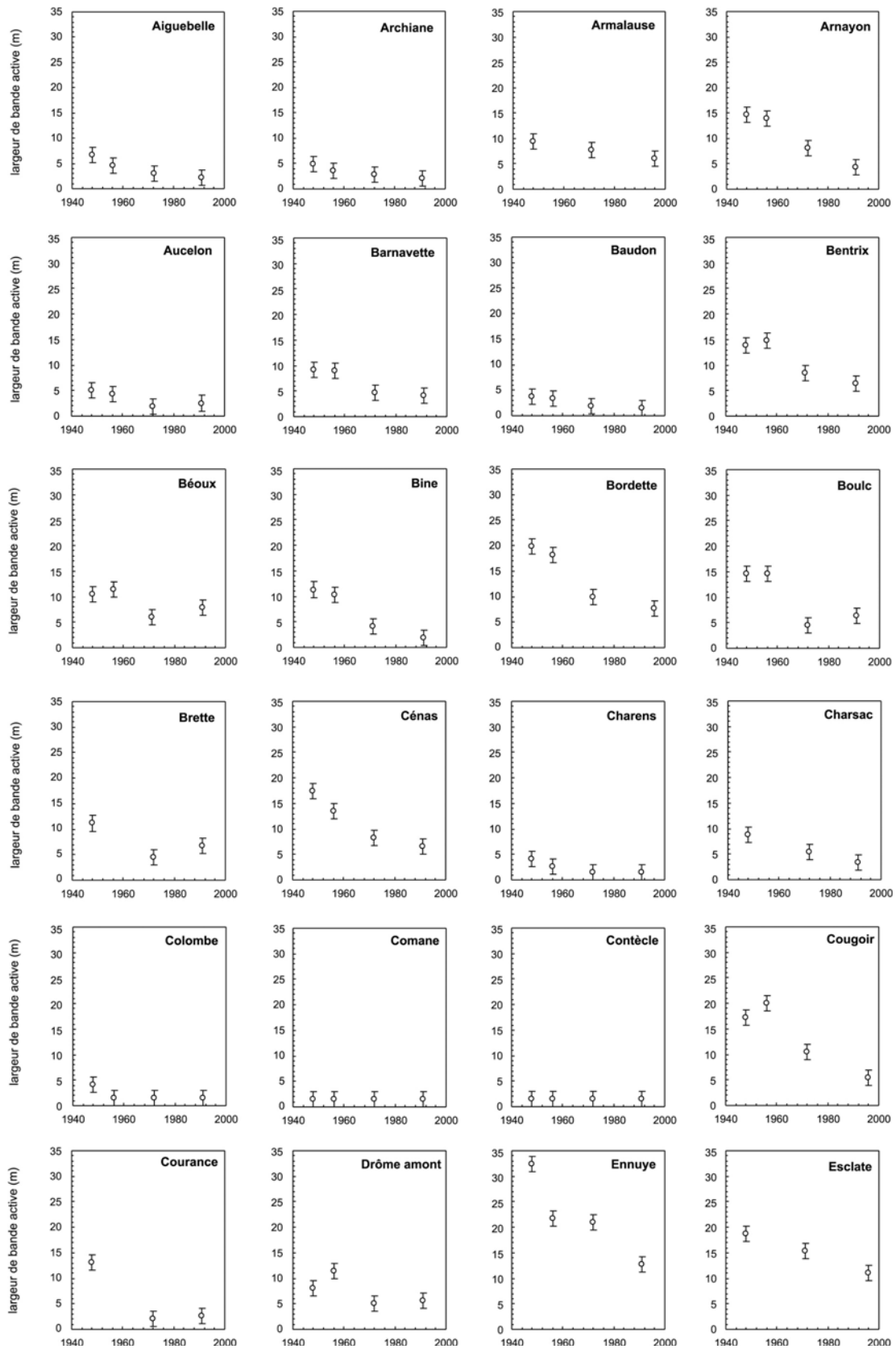


Figure 42 (suite)

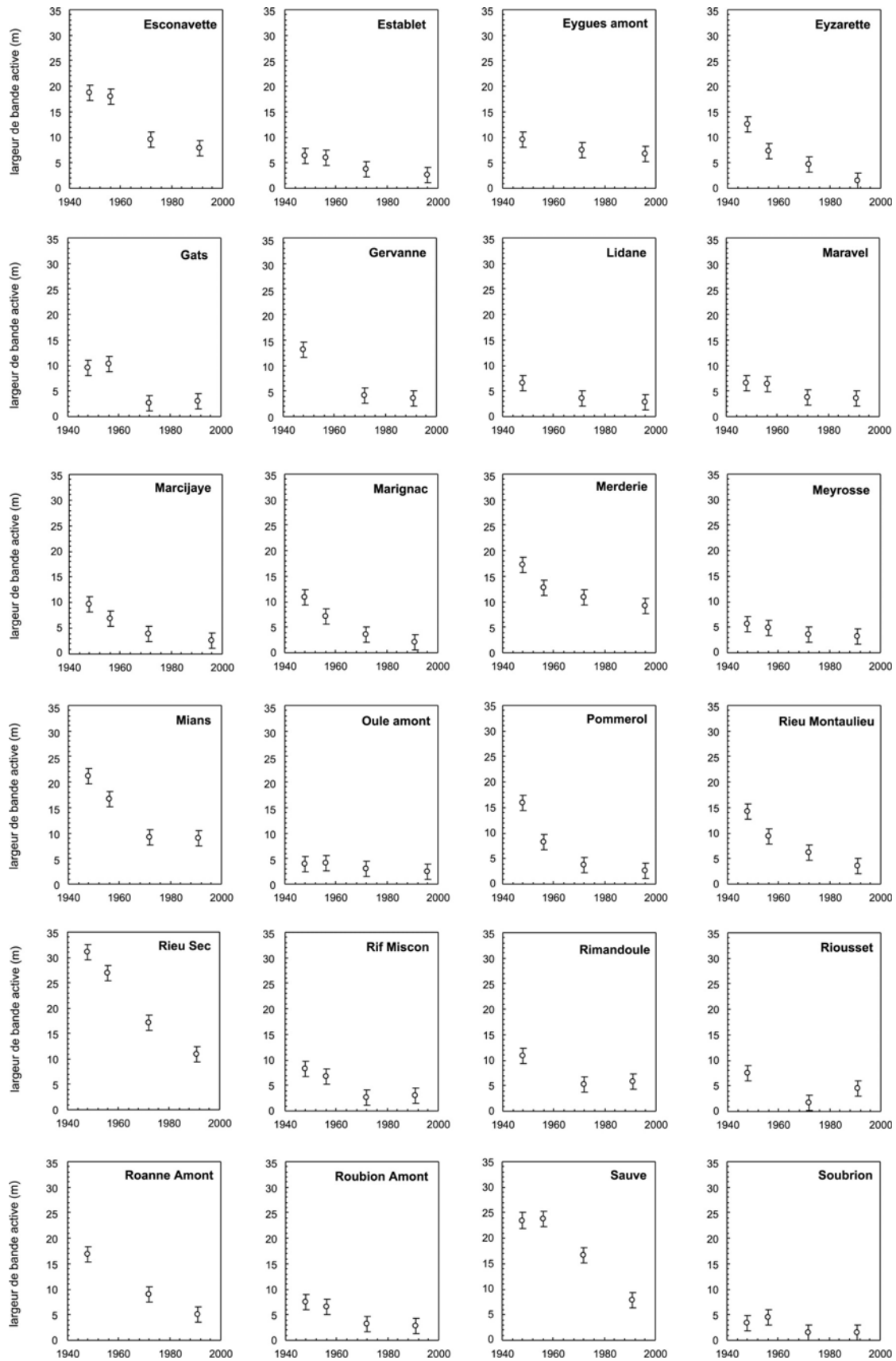


Figure 42 (suite)

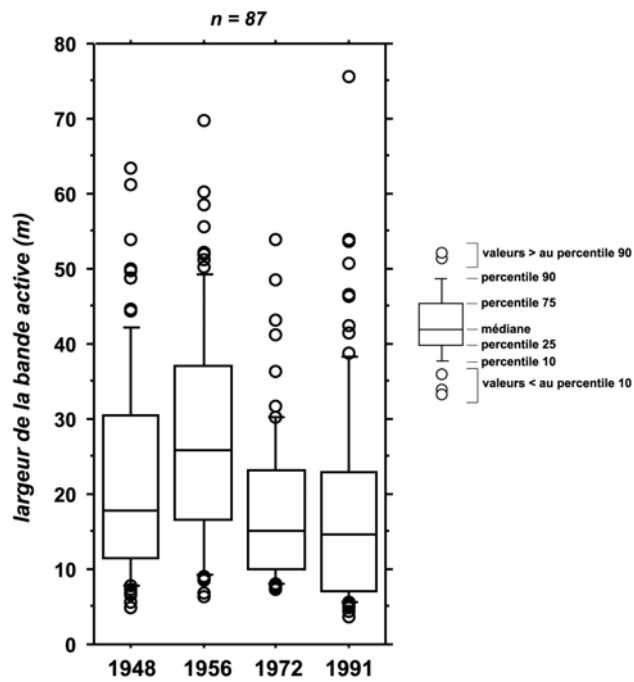
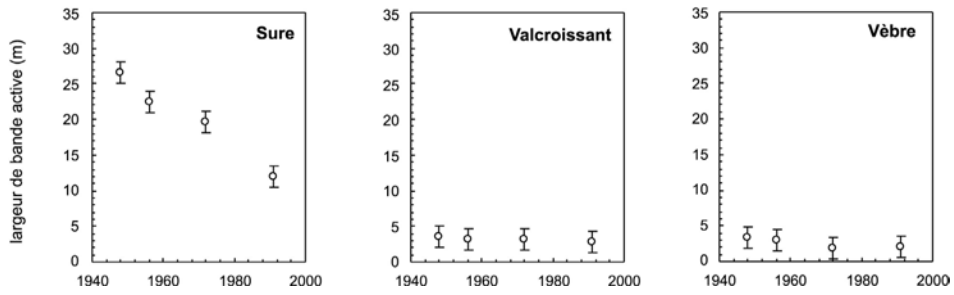


Figure 43

Evolution de la largeur de bande active observée sur la Haute-Drôme entre 1948 et 1991 ; n : nombre d'observations

1.2.1.2. Evolutions depuis 1850

La rétraction des bandes actives mise en évidence sur les 50 dernières années doit être recadrée dans une échelle de temps plus large afin de mieux évaluer l'importance et la nature des changements observés. Lorsque nous examinons les photographies aériennes de 1948, nous distinguons la présence de surfaces arbustives, parfois boisées, en marge ou à l'intérieur même des vastes bandes actives de l'époque (Fig. 45). L'observation de terrain nous révèle que ces surfaces, lorsqu'elles ont été bien conservées dans la topographie, correspondent à un niveau de terrasse situé à environ 1 ou 2 mètres au-dessus du lit actif de 1948. Elles correspondraient donc à une ancienne bande active stabilisée avant 1948. Ces terrains suggèrent l'existence d'une dynamique de colonisation végétale des lits fluviaux, antérieure à celle établie d'après les photographies aériennes de la seconde moitié du 20^e siècle.

L'utilisation des anciens plans des Ponts et Chaussées et du cadastre napoléonien permet de caractériser l'état des bandes actives dans la seconde moitié du 19^e siècle pour quelques affluents. Certains de ces documents ont été établis sur des tronçons suffisamment longs pour envisager une quantification des changements et ils permettent de prolonger les courbes d'évolution des bandes actives obtenues à partir des photographies aériennes (Fig. 46A).

Les résultats obtenus montrent que la rétraction post-1950 n'est que l'accélération d'un phénomène d'ampleur séculaire. Les 6 affluents étudiés se caractérisent en effet par une diminution des largeurs entre le milieu du 19^e et le milieu du 20^e siècle. L'absence de points intermédiaires ne permet pas de déceler une éventuelle complexité temporelle du phénomène. Celui-ci a pu se produire graduellement sur l'ensemble de la période, ou de façon accélérée sur un laps de temps plus court. La rétraction antérieure à 1950 est particulièrement forte sur la Gervanne et la Béoux où elle atteint des valeurs supérieures à 20 cm an⁻¹. Sur les autres cours d'eau, ces valeurs sont comprises entre 8 et 18 cm an⁻¹.

Les courbes obtenues sur la plupart des rivières étudiées montrent clairement que la rétraction postérieure à 1950 constitue une rupture dans l'évolution des lits fluviaux. La stabilisation végétale des bandes actives s'accélère dans la seconde moitié du 20^e siècle, y compris sur des rivières comme l'Eygues, qui draine un bassin versant de 1100 km². Les largeurs diminuent selon des taux parfois supérieurs à 1 m an⁻¹, comme sur la Sure, le Bentrax ou la Béoux. Des exceptions sont à signaler : la Gervanne et le Soubrion n'enregistrent pas de rupture de tendance après 1950. Ceci peut s'expliquer aisément sur le Soubrion. En 1948, ce cours d'eau présente une bande active déjà trop étroite pour permettre une installation de la végétation dans les années qui suivront. Ce n'est pas le cas sur la Gervanne. On peut émettre ici l'hypothèse d'une rétraction accélérée plus précoce, qui se serait produite dans les années 1930 ou 1940. On observe en effet que les anciens bancs de graviers actifs du plan de 1867 correspondent, sur les photographies aériennes de 1948, à des espaces occupés par une végétation pionnière de type arbustif.

Tableau 14

Résultats du test de Scheffé conduit sur les largeurs de bande active mesurées à différentes dates sur la Gervanne, la Bine et la Sure (en gras : différence significative de moyenne au niveau de confiance 95 % ; W : largeur de bande active à la date mentionnée)

La GERVANNE				
	W1948	W1972	W1991	
W1867	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	
La BINE				
	W1948	W1956	W1972	W1991
W1828	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001
La SURE				
	W1948	W1956	W1972	W1991
W1864	0,0003	< 0,0001	< 0,0001	< 0,0001

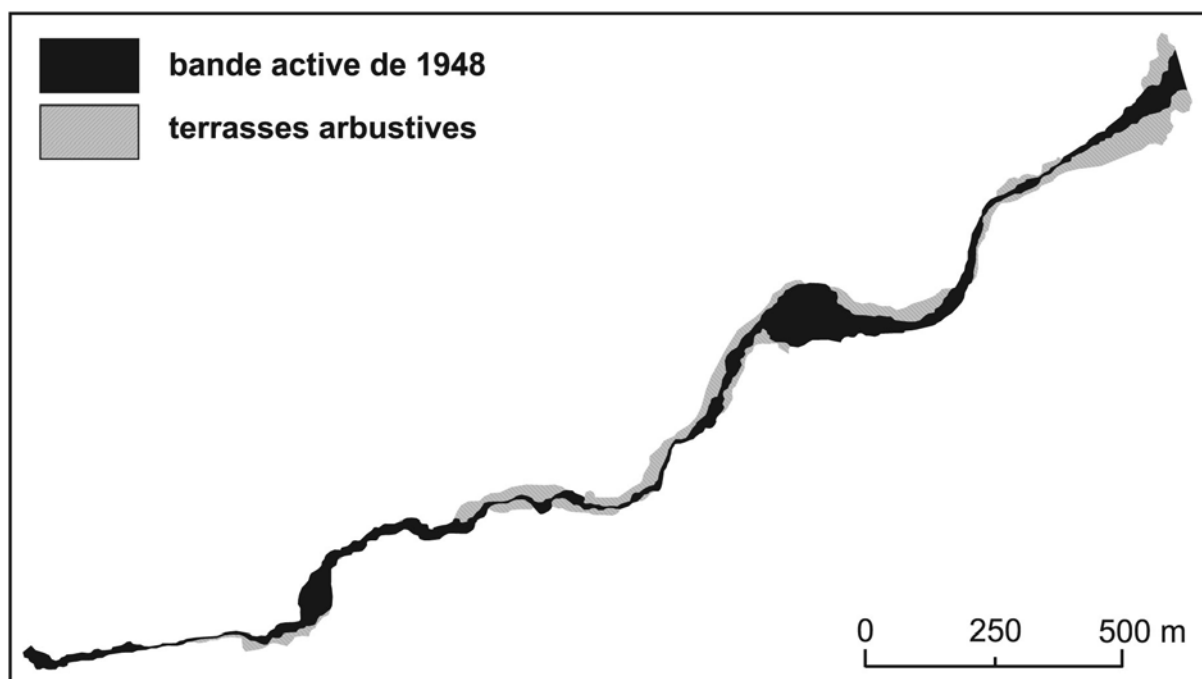


Figure 45

L'état du lit de l'Esconavette d'après les photographie aériennes de 1948 ; la bande active de l'époque est souvent bordée par des terrasses arbustives qui suggèrent une dynamique de rétraction antérieure à 1948

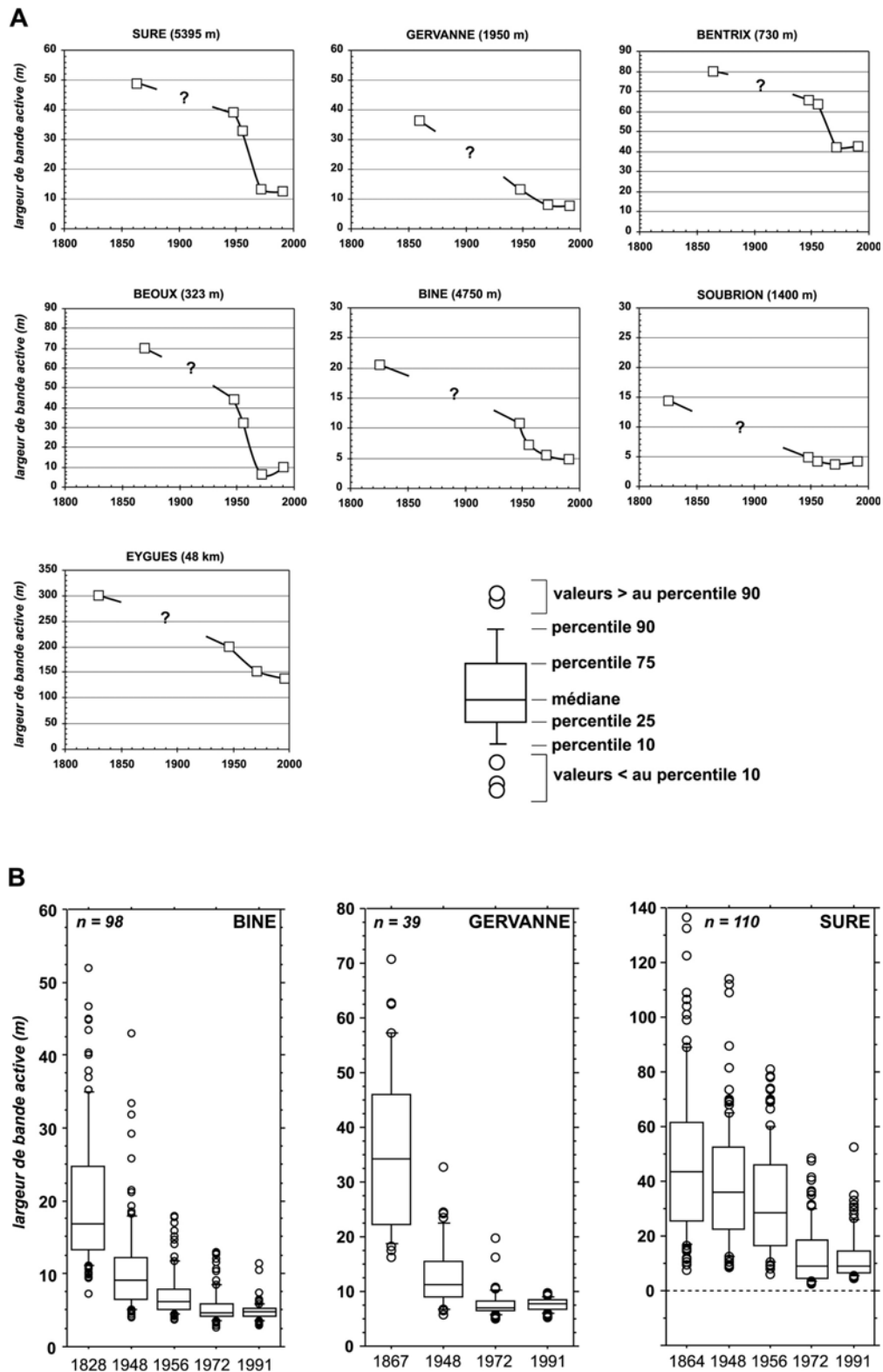


Figure 46

Évolutions des largeurs de bande active sur les 150 dernières années ; A : évolutions de la largeur de la bande active depuis le milieu du 19^e siècle sur quelques affluents des Préalpes du Sud ; les valeurs entre parenthèses correspondent aux longueurs des tronçons de mesure ; les valeurs obtenues sur l'Eygues [Liébault et Piégay, 2002] sont données à titre de comparaison ; B : distributions des largeurs de bande active obtenues à différentes dates sur 3 affluents (n : nombre d'observations)

L'étude de la distribution des largeurs de bande active aux différentes dates d'observation permet de tester statistiquement la significativité des tendances observées sur le temps long (Fig. 46B ; Tab. 14). Ces tests ont été réalisés uniquement sur les cours d'eau disposant d'un nombre jugé suffisant d'observations (> 30). Les résultats de l'ANOVA complétée par un test a posteriori de Scheffé montrent des différences significatives de largeur sur l'ensemble des comparaisons effectuées.

Ces différents résultats permettent de définir l'évolution post-1950 comme un changement durable et sans précédent des surfaces alluviales actives à l'échelle des 150 dernières années, même si les informations manquent pour caractériser une éventuelle complexité temporelle du phénomène entre 1850 et 1950. Il faut cependant nuancer cette possible complexité dans la mesure où les photos du début du 20^e siècle montrent la persistance de grandes bandes de tressage sur plusieurs affluents et ne laissent pas présager d'une éventuelle phase de rétraction dans la seconde moitié du 19^e siècle (Fig. 47).

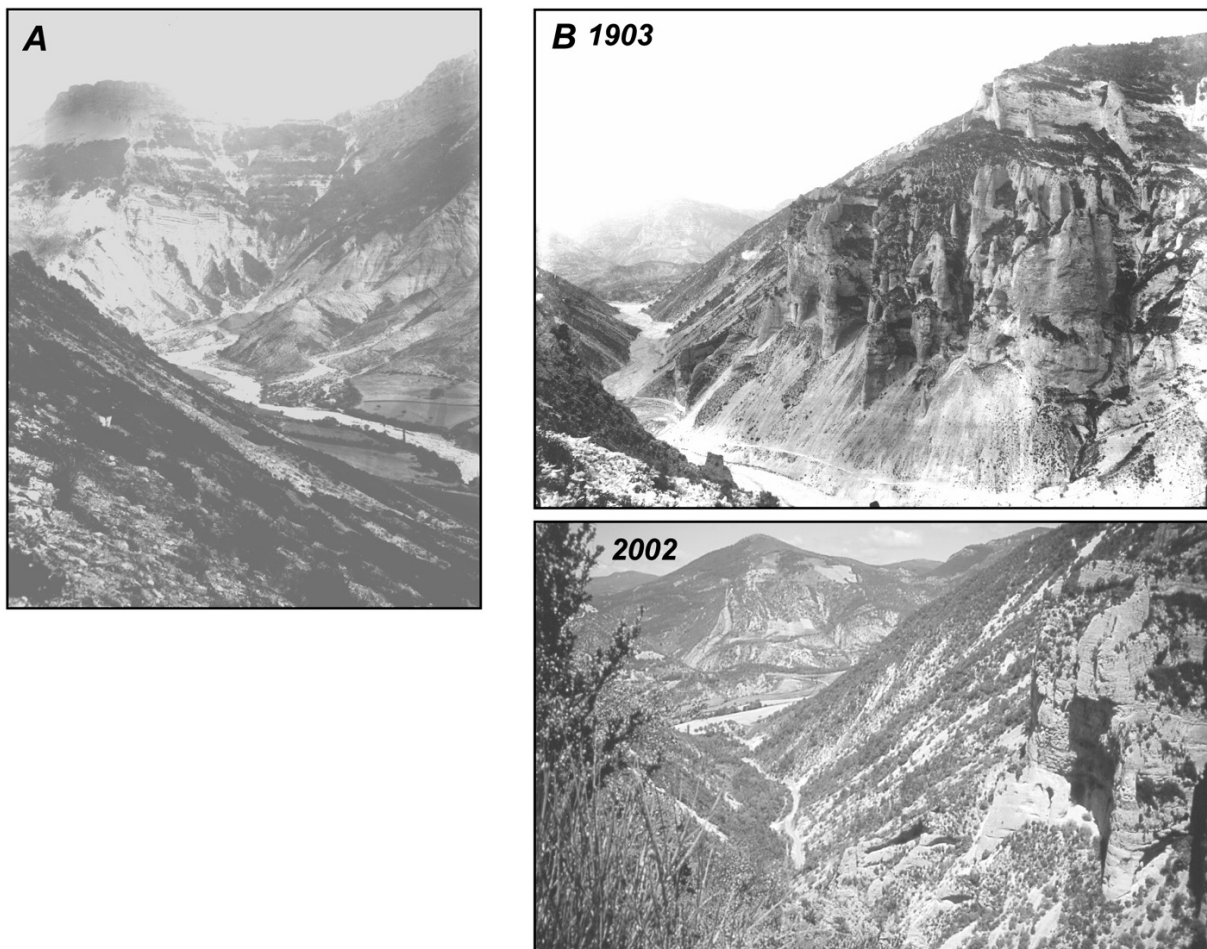


Figure 47
Exemples d'anciens clichés RTM du début du 20^e siècle ; A : la Sure et le bassin de réception du Ravin de Font d'Urle en 1904 (collection RTM, ONF de Die) ; B: le Ruisseau de Pommerol dans les gorges en 1903 (collection RTM, ONF de Die) et en 2002 (cliché FL)

1.2.2. L'organisation géographique du changement fluvial

Après avoir présenté les grandes tendances d'évolution des bandes actives au cours du temps, il faut s'interroger sur l'organisation géographique de la rétraction, à savoir la variabilité spatiale du phénomène, à l'échelle régionale (inter-bassin) et à l'échelle du bassin versant élémentaire (intra-bassin).

1.2.2.1. Comparaisons régionales

L'organisation régionale de la rétraction des bandes actives a été étudiée à partir d'une cartographie des taux de rétraction sur la période 1948-1991(96) (Fig. 48). Cette approche laisse entrevoir une concentration des bassins à faible rétraction dans les secteurs amont, exception faite du bassin du Bez. Il faut tout de même nuancer le propos car nous n'observons pas de regroupements clairement différenciés, mais plutôt une logique de bassins versants aux comportements propres. Les grandes entités régionales du secteur d'étude (contreforts du Vercors, Diois, Baronnies, Pays de Bourdeaux) ne montrent pas de différenciations nettes.

Une ANOVA effectuée sur les valeurs du taux de rétraction calculé pour différentes périodes permet de comparer les affluents des 3 grandes aires de drainage : la Drôme, l'Eygues et le Roubion (Fig. 49 ; Tab. 15). Les résultats sur la période 1948-1971(72) ne montrent pas de différences significatives entre les 3 bassins. La tendance à la rétraction sur les 50 dernières années peut être considérée comme régionalement homogène. Les valeurs moyennes obtenues pour les affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion sont respectivement de 49,44%, 41,78% et 56,00%. Entre 1971 et 1991, une différence significative est observée entre la Drôme et l'Eygues. Alors que les affluents de la Drôme connaissent une stabilisation, voire un léger élargissement de leur bande active (taux de rétraction moyen de -5,24%), ceux de l'Eygues enregistrent une rétraction encore forte (29,54%), bien qu'atténuée par rapport à la période antérieure. Cette différence peut s'expliquer par un potentiel de colonisation végétal encore fort en 1972 sur les affluents de l'Eygues. Ceux-ci présentent en effet à cette date des bandes actives bien plus larges que celles de la Drôme et du Roubion (Fig. 50). La végétalisation des bancs de graviers peut donc se poursuivre ici à un rythme soutenu, contrairement aux affluents de la Drôme et du Roubion qui ont vraisemblablement terminé leur rétraction dès le début des années 1970. On note également que les différences de largeur entre les affluents des 3 bassins ont tendance à se réduire au cours du temps. La rétraction post-1950 des bandes actives aurait ainsi tendance à réduire progressivement la variabilité régionale de la largeur des lits fluviaux.

Tableau 15

Résultats du test de Scheffé conduit sur les valeurs moyennes du taux de rétraction des affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion

COMPARAISONS	PERIODES	
	1948-1971(72)	1971(72)-1991(96)
Drôme-Eygues	0,3987	0,0037
Drôme-Roubion	0,7426	0,2728
Roubion-Eygues	0,2709	0,7869

En gras : différence significative selon un niveau de confiance de 95 %

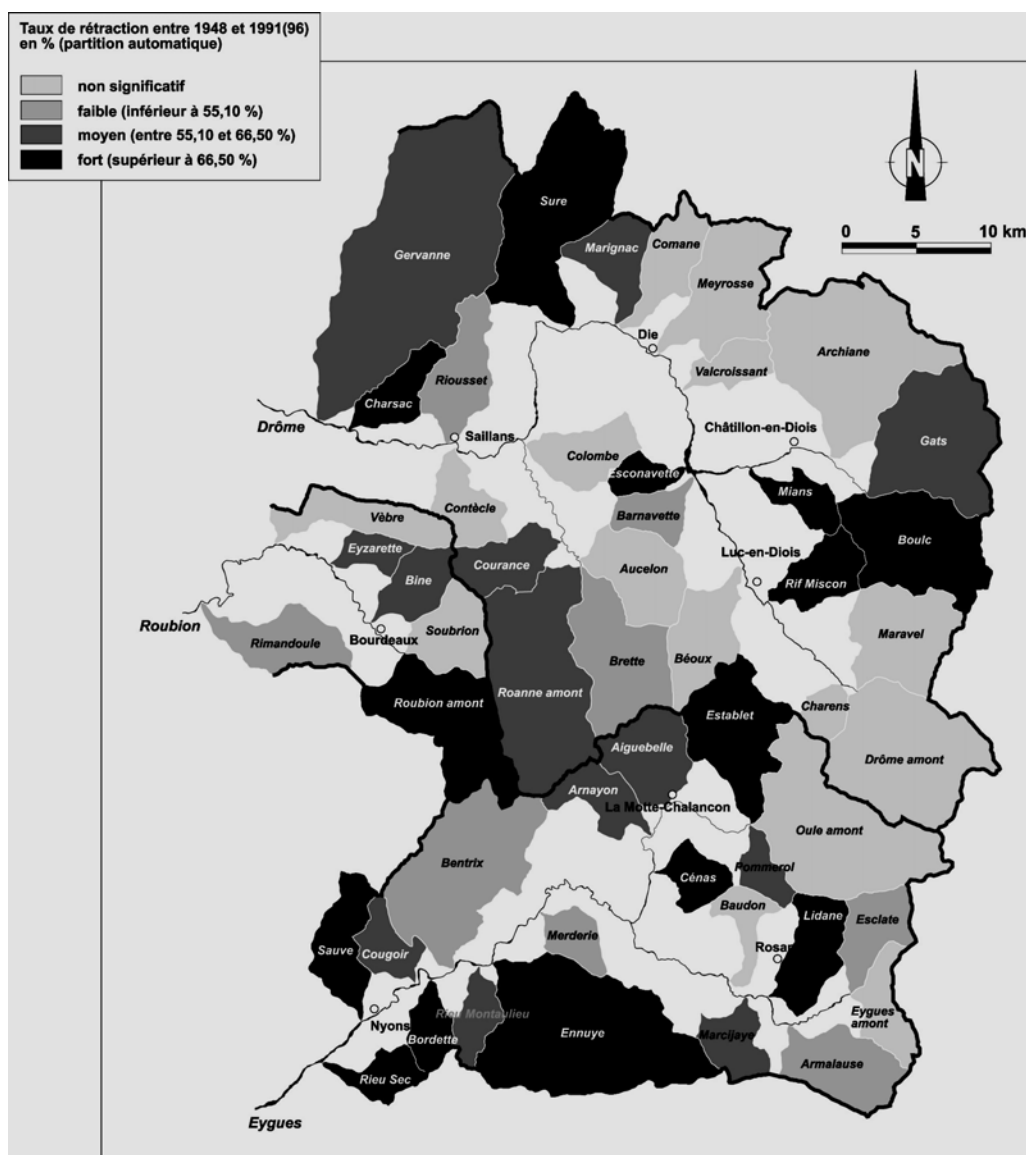
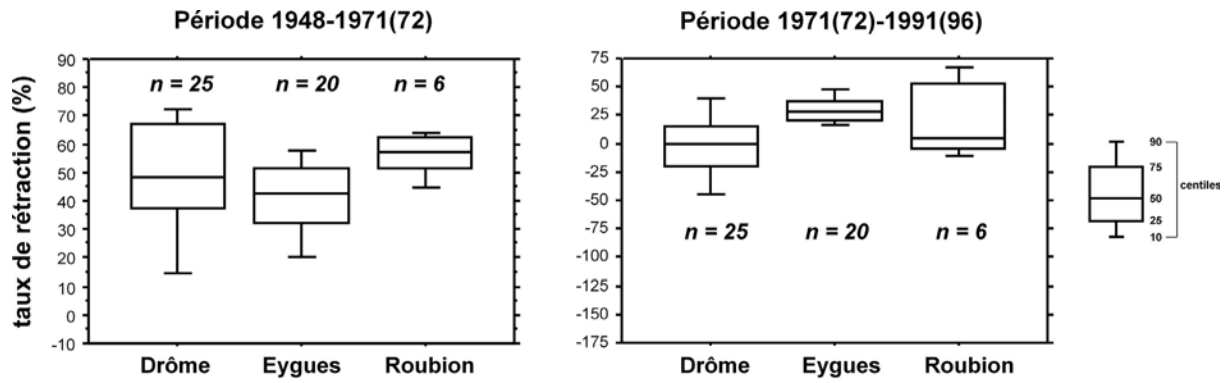


Figure 48

Variabilité régionale du taux de rétraction sur la période 1948-1991(96) ; nous avons retenu une technique de partition automatique proposée dans le logiciel Mapinfo qui permet d'obtenir un nombre d'enregistrement équivalent dans chaque classe



$$\text{TAUX DE RETRACTION} = \left[\frac{W_t - W_{t+1}}{W_t} \right] 100$$

avec W = largeur du lit (en m)

Figure 49

Comparaisons des taux de rétraction mesurés sur les affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion pour les périodes 1948-1971(72) et 1971(72)-1991(96) ; n : nombre d'observations (nombre d'affluents)

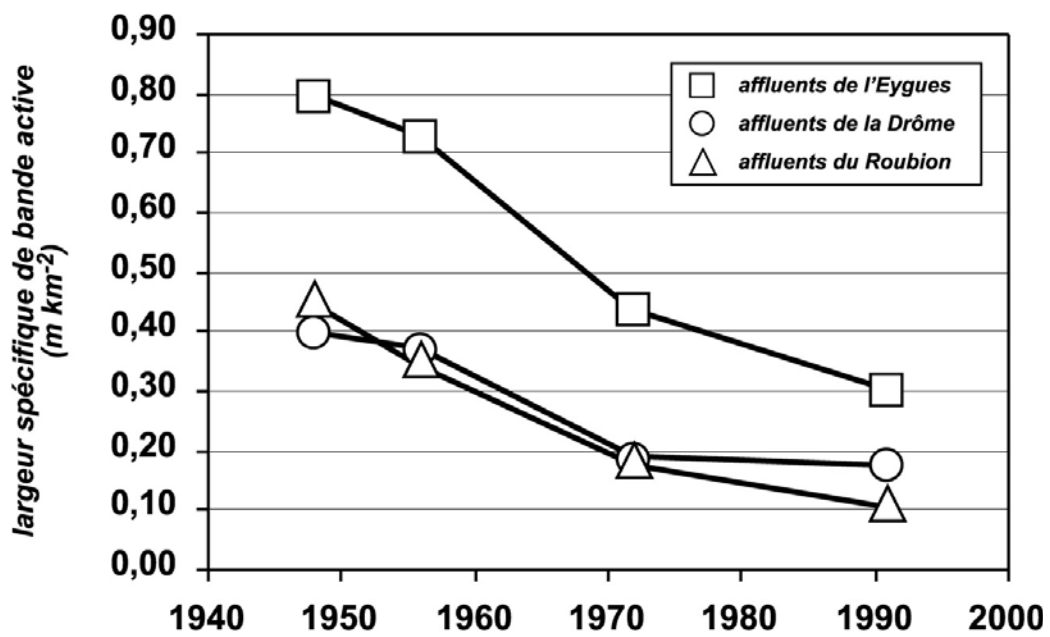


Figure 50

Evolution comparée des largeurs spécifiques moyennes de bande active des affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion sur la période 1948-1991(96)

1.2.2.2. Structures longitudinales du changement

Afin d'étudier la variabilité longitudinale de la rétraction des bandes actives au sein d'un même cours d'eau, certains affluents ont fait l'objet de mesures diachroniques de largeur à intervalles réguliers le long de tronçons préalablement délimités (Fig. 51). Ce type de démarche permet de mettre en évidence l'organisation spatiale du phénomène. Les diagrammes obtenus montrent que la rétraction est un phénomène généralisé. Les rares secteurs épargnés correspondent aux tronçons déjà étroits en 1948. La dynamique de colonisation végétale des lits fluviaux a contribué à lisser la variabilité longitudinale des largeurs. Les anciennes grandes bandes de tressage, qui correspondaient aux secteurs les plus larges de 1948, ont été particulièrement affectées par l'installation de la végétation et elles se sont progressivement transformées en chenaux uniques. Ce lissage longitudinal des largeurs est observé sur la plupart des cours d'eau étudiés, exception faite de la Bordette et de l'Esconavette qui arrivent à maintenir des tronçons élargis sur leurs cours terminaux. Ces espaces de tressage résiduels vont certainement disparaître dans les années à venir et subir le même sort que leurs prédécesseurs.

La Bordette et l'Esconavette montrent que les bandes de tressage résiduelles se maintiennent préférentiellement à l'aval. Ce constat ne doit pas être systématiquement considéré comme un héritage de l'état initial. Autrement dit, les tronçons actuellement larges ne correspondent pas toujours aux tronçons larges de 1948. Ainsi, sur l'Esconavette, les bandes de tressage résiduelles se sont maintenues sur le cône de déjections, alors que l'ancienne bande de tressage située au niveau du PK 1 s'est fortement rétractée. Un constat identique peut être fait sur la Bordette en comparant les secteurs centrés sur les PK 0,5 et 1,5.

D'autres affluents, dont la rétraction a été étudiée à partir d'une cartographie diachronique des bandes actives, permettent d'illustrer l'hétérogénéité amont-aval de la rétraction (Fig. 52). Ces exemples suggèrent une végétalisation progressive des bandes actives depuis l'amont. Le cas de la Sure, dont l'évolution morphologique a pu être reconstituée depuis le milieu du 19^e siècle, met également en évidence une progression vers l'aval de la rétraction sur un tronçon de 6 km de long (Fig. 53). Entre 1867 et 1948, la rétraction est observée uniquement à l'amont du PK 9,80. La bande active s'élargit à l'aval de ce point. Entre 1948 et 1972, la rétraction s'est propagée à l'ensemble du tronçon d'étude et ses plus fortes valeurs sont observées dans l'ancienne zone d'élargissement du lit. La période 1972-1991 se caractérise par une stabilisation des largeurs et semble indiquer le retour à une situation d'équilibre dynamique.

Figure 51

Distributions longitudinales des largeurs de bande active à différentes dates et du taux de rétraction sur 6 affluents ; W : largeur de bande active à la date mentionnée (en mètres)

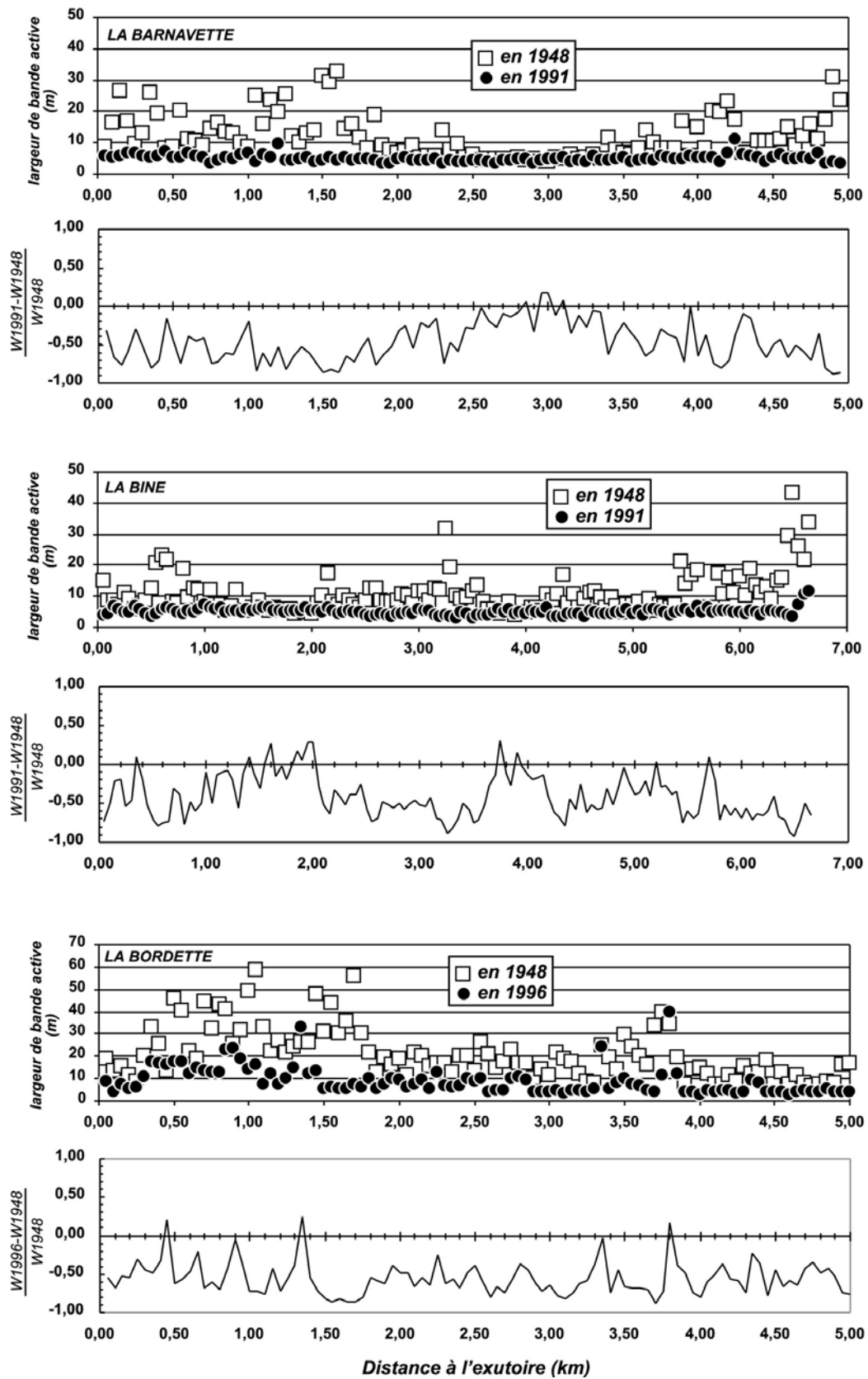
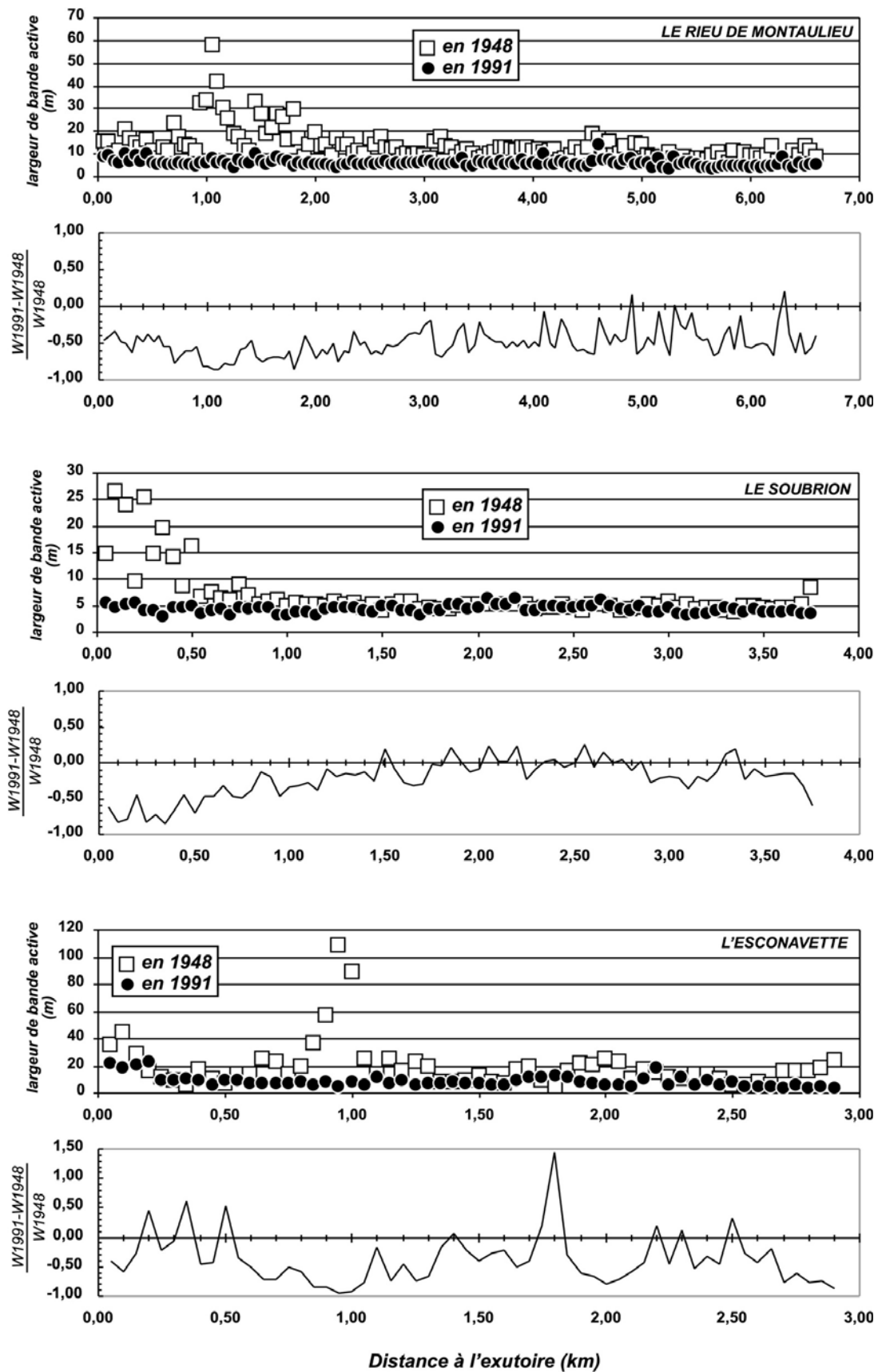


Figure 51 (suite)



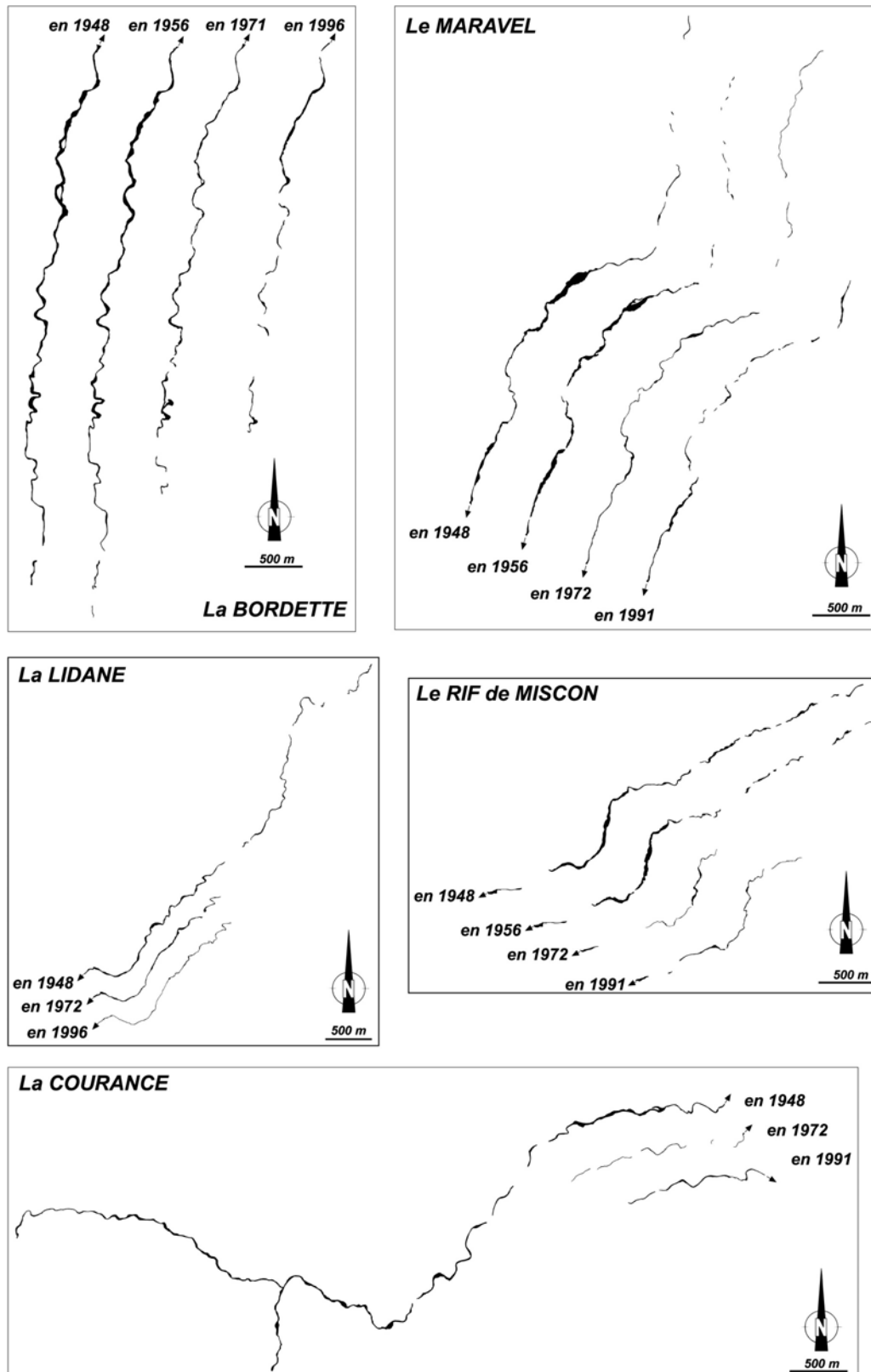


Figure 52
Exemples de cartographies diachroniques des bandes actives sur quelques affluents (d'après les photographies aériennes)

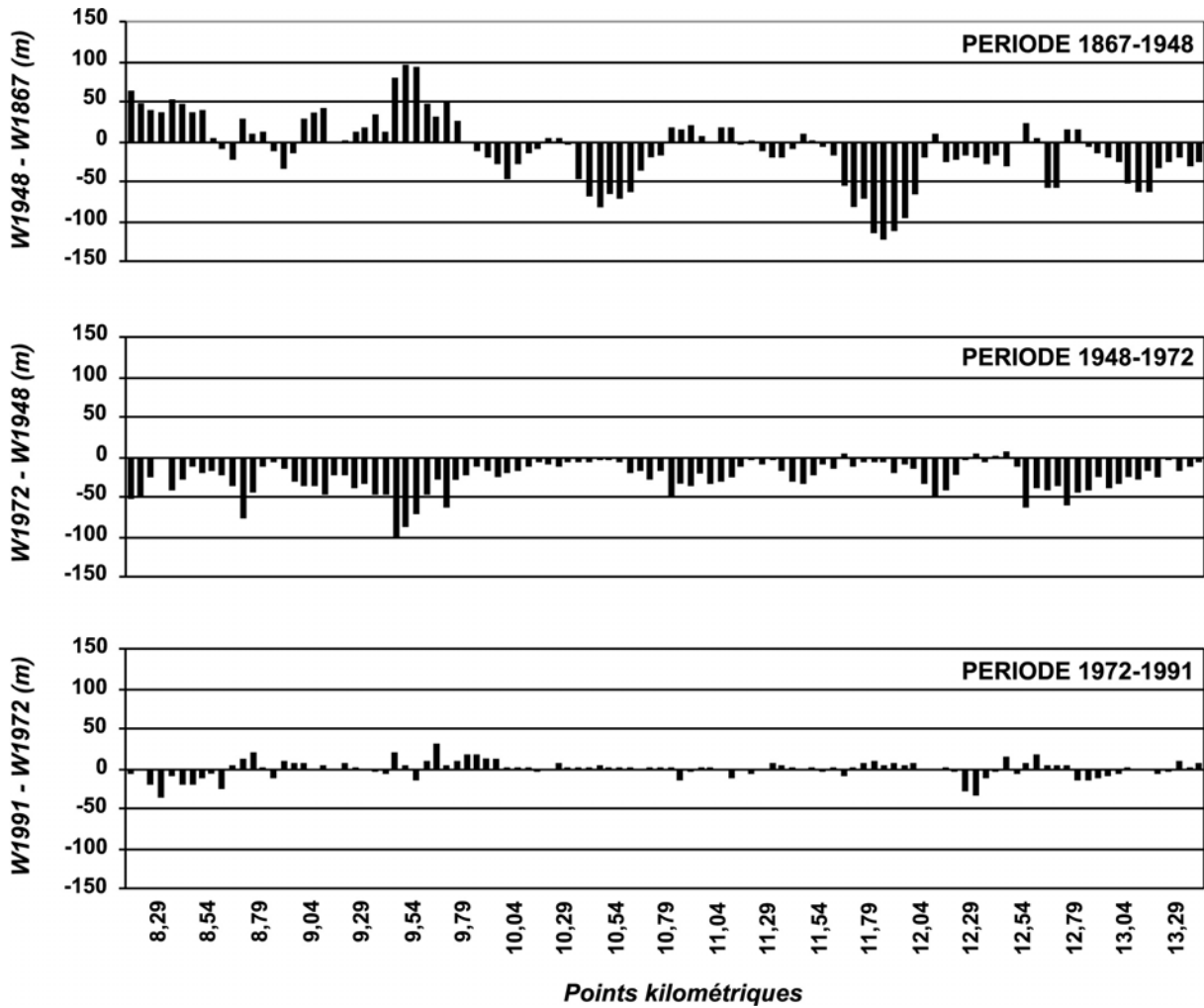


Figure 53

Evolutions diachroniques des largeurs de bande active sur la Sure d'après l'ancien plan de 1867 et les photographies aériennes de 1948, 1972 et 1948 (W : largeur de bande active à la date mentionnée)

1.2.3. Analyses morphologiques et datations des changements fluviaux

1.2.3.1. Morphologies anciennes et actuelles

ENSEIGNEMENTS DES ANCIENS PROFILS EN TRAVERS

La compréhension des mécanismes à l'origine de la rétraction des bandes actives nécessite un examen détaillé des formes fluviales actuelles et passées. L'observation de la topographie de détail des fonds de vallée et de la végétation alluviale permet d'entrevoir les processus à l'origine des ajustements morphologiques mis en évidence à partir des photographies aériennes et anciennes cartes.

L'ancienne administration des Ponts et Chaussées nous a légué quelques levés cartographiques et topographiques de détail sur plusieurs affluents. Certains de ces documents, qui datent de la fin du 19^e siècle, sont d'une clarté et d'une précision telles qu'ils constituent une aide à l'interprétation des changements fluviaux. Le plan de 1898, établi sur la Comane dans le cadre d'un projet de protection de berges, montre une bande active de 10 mètres de large incisée de 1,60 à 1,80 mètres dans un niveau topographique occupé par des graviers et oseraies (formations végétales arbustives, composées généralement de saules ou d'autres espèces typiques des milieux alluviaux) (Fig. 54A). Ce niveau peut être interprété comme une ancienne nappe caillouteuse en cours de stabilisation. Il est également possible que le stade pionnier se maintienne ici sous l'influence d'une pression pastorale encore forte. La forme en plan du cours d'eau se caractérise par un chenal unique sinueux, à bancs alternes, qui suggère une charge de fond relativement importante. Ce plan montre également une berge d'érosion en rive gauche, à mettre certainement en relation avec l'arrivée du Ruisseau de Vandonne qui conflue en rive opposée, à l'amont immédiat de la zone d'instabilité latérale, et qui, du fait d'apports en matériaux nécessairement importants, a contribué à dévier le cours de la Comane sur sa rive gauche. Ce plan présente donc un projet de clayonnage en rive gauche dont l'objectif est de stabiliser cette berge dont le recul se fait au détriment d'une prairie. Cet état contraste avec celui qui est visible sur les photographies aériennes de 1948. Le cours d'eau est totalement masqué par la végétation riveraine et sa largeur active est inférieure à 5 mètres. La rétraction s'est donc poursuivie vraisemblablement jusque vers le milieu du 20^e siècle où elle a atteint son maximum, le cours d'eau étant ensuite trop étroit pour permettre une nouvelle progression de la végétation.

Il aurait été intéressant de lever la topographie actuelle du secteur afin d'effectuer des comparaisons avec les anciens profils en travers. Suite à une reconnaissance rapide de terrain, ce travail nous est apparu inutile compte tenu de la forte anthropisation du site. Le cours d'eau est enroché sur ses deux rives et le fond de vallée a été remodelé et il est actuellement occupé par des terres agricoles, si bien qu'il est devenu impossible de reconnaître les anciennes unités topographiques visibles sur le plan de 1898, ou de dater une éventuelle installation forestière.

L'évolution morphologique de la Meyrosse a été étudiée à partir d'un plan de 1892 qui concerne un tronçon de 200 mètres de long (Fig. 54B). Il s'agit d'un secteur sinueux à bancs alternes, partiellement contrôlé par des digues. La bande active présente une largeur moyenne de 18 mètres. Les pro-

files en travers 2 et 3 indiquent que le chenal d'étiage est enfoncé de 1,25 à 1,80 m dans des bancs de graviers non végétalisés. Nous sommes vraisemblablement en présence d'un tronçon en cours d'incision. Cet enfoncement induit une déconnexion des bancs de graviers, qui vont devenir progressivement le lieu d'une installation végétale durable. Les photographies aériennes de 1948 montrent en effet que ces anciens bancs sont occupés par une forêt alluviale bien conservée. Cet exemple suggère que l'incision du lit se produit avant l'installation de la végétation, qui doit être alors interprétée comme une conséquence de la déconnexion des anciennes portions de bande active. Une reconnaissance de terrain effectuée en février 2001 a révélé que les anciens bancs de graviers du plan de 1892 sont occupés aujourd'hui par une forêt de pins sylvestres, dont le plus vieux sujet a 65 ans. Il faut cependant émettre des réserves sur la signification morphologique de cet âge, dans la mesure où une mise en valeur agricole du site a peut-être perduré jusqu'au milieu du 20^e siècle. Il faut en effet considérer ici une dynamique de colonisation végétale plus précoce, comme l'atteste le rapport des Ponts et Chaussées de 1892, rédigé lors du projet de protection de berge à l'origine des levés topographiques. Ce rapport indique que les atterrissements perchés se couvrent progressivement « d'oseraies, de saules et de gazons ».

L'exemple de la Barnavette vient confirmer l'existence d'une probable phase d'incision ancienne (Fig. 54C). Une série de 6 profils en travers ont été levés en 1901 dans le cadre d'un projet de construction de seuil. La figure 54C présente l'un d'entre eux. Le niveau du lit relevé quelques années avant l'établissement des profils en travers (aucune indication précise n'est fournie sur la date du relevé) montre une incision récente variant entre 0,40 et 0,84 m. D'autre part, la plupart des profils décrivent un lit actif incisé de 1 m dans un niveau topographique occupé par une oseraie, correspondant sur le plan à l'ancienne bande active du cadastre napoléonien. Les autres profils montrent une géométrie de lit confiné, d'une largeur à pleins bords comprise entre 7 et 9 m, et d'une profondeur maximale comprise entre 2,15 et 2,60 m. Ces documents ont été réalisés dans le cadre d'un projet d'établissement d'un seuil de calage du fond dont l'objectif est vraisemblablement de stopper ce processus d'incision en cours et de stabiliser le passage à gué du chemin reliant Barnave à Recoubeau. La rapport joint aux profils signale que « *le lit de la Barnavette s'affouillant continuellement depuis quelques années, le passage dans le ruisseau n'a plus été possible* ». La déconnexion hydraulique des surfaces abandonnées par incision est également visible sur les profils, grâce à l'indication du niveau des hautes-eaux de l'époque. Ce niveau, probablement déterminé suite aux discussions avec les riverains, n'inonde plus l'ancien plancher alluvial, ce qui permet ainsi le développement de la végétation.

Les archives municipales de la commune de Montmaur-en-Diois (bassin versant de l'Esconavette) contiennent également plusieurs traces écrites qui témoignent de façon claire d'un enfoncement des lits fluviaux dans la première moitié du 20^e siècle [Keller, 2002]. Le 19 juin 1904, un gué a été déstabilisé sur le torrent du Marcousse, au lieu-dit *Quartiers de Pré Laval* (Fig. 54D). Il est signalé que « *par suite des travaux de reboisement, le torrent de Marcousse n'entraîne plus ses bords mais au*

contraire, toutes les fois qu'il se produit une pluie un peu forte, il creuse, faisant tomber ses berges... ». Les riverains demandent alors à l'administration des Eaux et Forêts la construction d'un barrage pour stopper l'incision du ruisseau. Le 23 juin 1928, l'enfoncement du lit de l'Esconavette est signalé à proximité de l'exutoire, aux lieux-dits *Brunette* et *Seillon* et le conseil municipal demande à nouveau la construction d'ouvrages de stabilisation (Fig. 54D). Ces écrits révèlent une incision qui s'est propagée depuis l'amont, selon une vitesse de l'ordre de 100 m an^{-1} , à condition de considérer ces 2 délibérations comme les témoignages d'une même vague d'ajustement morphologique qui s'est déplacée longitudinalement.

Compte-tenu de ces différents éléments, est-il possible de conclure à l'existence d'une phase d'incision ancienne, à la charnière du 19^e et du 20^e siècle ? Doit-on considérer les différences altitudinales observées entre le fond du lit et les bancs non végétalisés comme les signes d'une incision, ou plutôt comme des fluctuations normales de la géométrie fluviale ? Les nombreux relevés topographiques effectués dans le cadre de cette thèse amènent des éléments de réponse. Nous disposons de 155 profils en travers d'affluents qui permettent de mesurer avec précision l'amplitude des variations altitudinales du lit mineur, à savoir la différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas de la bande active. La distribution des valeurs est présentée en Figure 55. Les résultats obtenus montrent une distribution de type log-normale, avec 90 % des valeurs qui sont inférieures ou égales à 0,77 m. La moyenne est de 0,41 m. Ces valeurs démontrent que les différences d'altitudes mesurées sur les anciens profils entre le fond du lit et le sommet des bancs sont bien au delà des fluctuations topographiques normales mesurées aujourd'hui et elles peuvent être interprétées comme des signes évidents d'incision.

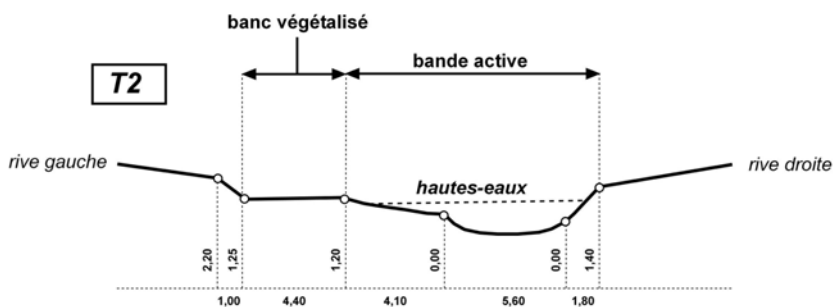
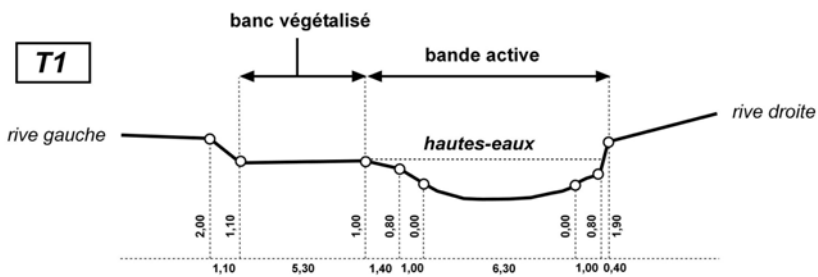
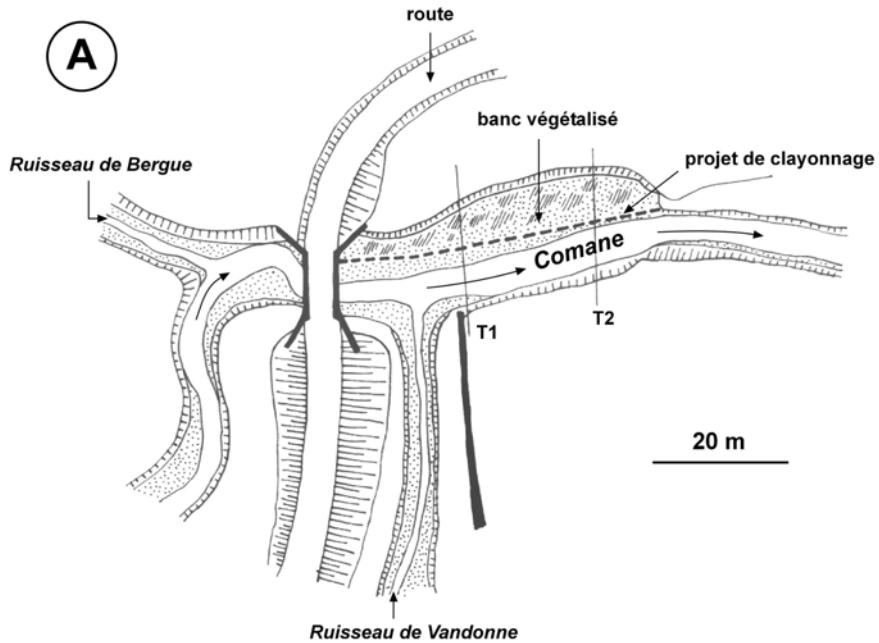
Il faut cependant rester prudent sur l'interprétation de ces observations car l'enfoncement du lit dans ses bancs de graviers peut se produire sous l'effet de contraintes locales ou à la suite d'une crue particulièrement forte. Les anciens documents topographiques dont nous disposons ont été levés dans le cadre de projets de travaux dont l'objectif est de rétablir une géométrie fluviale qui vient d'être modifiée par une crue.

ENSEIGNEMENTS DES PROFILS EN TRAVERS ACTUELS

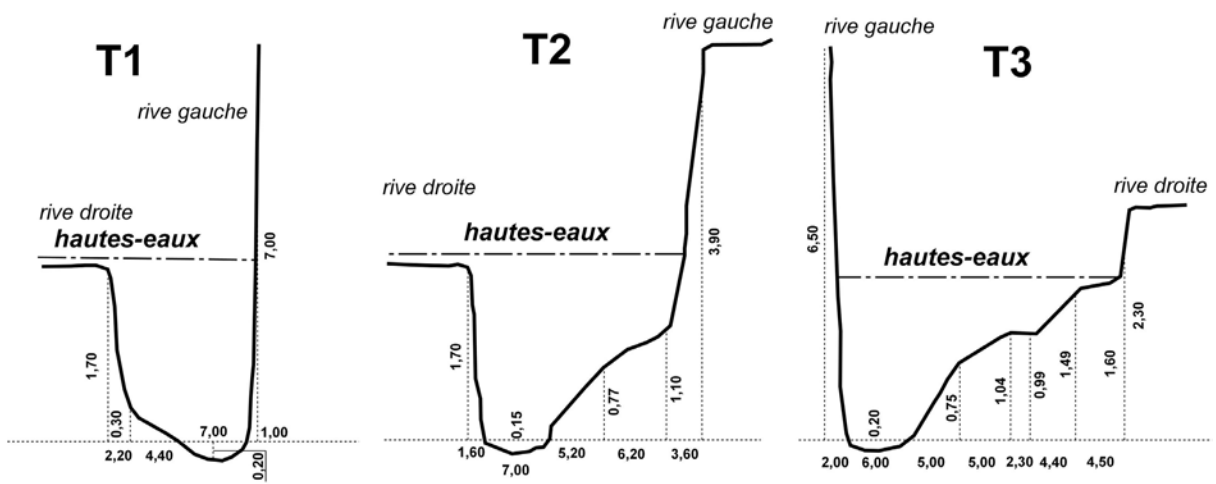
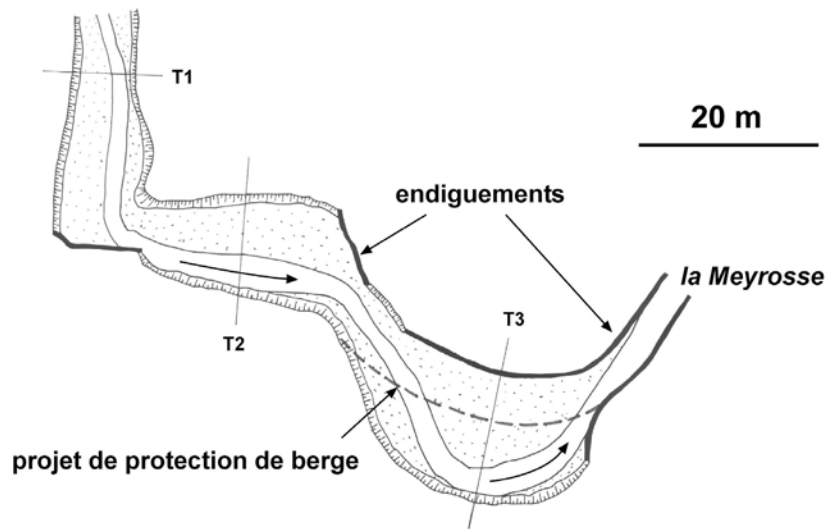
Plusieurs sites caractérisés par une végétalisation marquée de leur ancien lit actif ont fait l'objet de levés topographiques le long de transects (Fig. 56). Ces secteurs ont été sélectionnés après consultation des photographies aériennes de 1948 et 1991. Conjointement aux levés de profils en travers, nous avons observé la végétation et les sédiments de surface présents sur les différents niveaux topographiques rencontrés. Ces éléments nous renseignent sur les processus qui ont conduit à la rétraction post-1948 des lits fluviaux.

Figure 54

Ajustements morphologiques de quelques affluents au 19^{ème} siècle et début 20^{ème} siècle d'après les documents cartographiques et topographiques des Ponts et Chaussées et les archives municipales ; A : Plan et profils en travers de la rivière Comane établis en 1898 dans le cadre d'un projet de protection de berges (Archives Départementales AD 57S47) ; B : Plan et profils en travers de la rivière Meyrosse établis en 1892 dans le cadre d'un projet de protection de berges (Archives Départementales, AD 57S47) ; C : Profil en travers de la Barnavette établi en 1901 dans le cadre d'un projet de construction de seuil (Archives Départementales, AD 57S44) ; D : localisation des tronçons affectés par un enfouissement du lit d'après les archives municipales de la commune de Montmaur-en-Diois, bassin versant de l'Esconavette

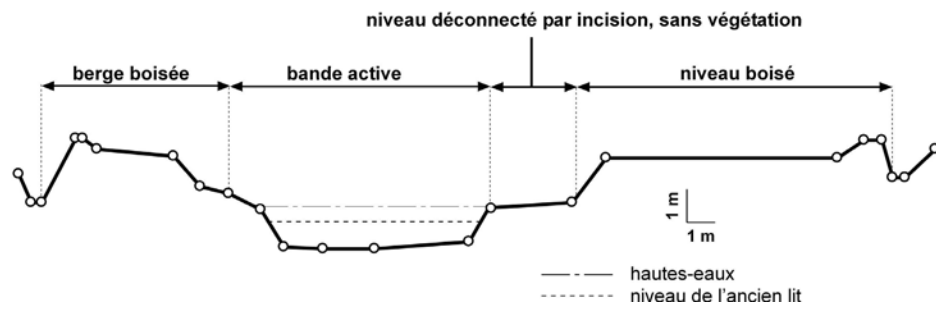


B

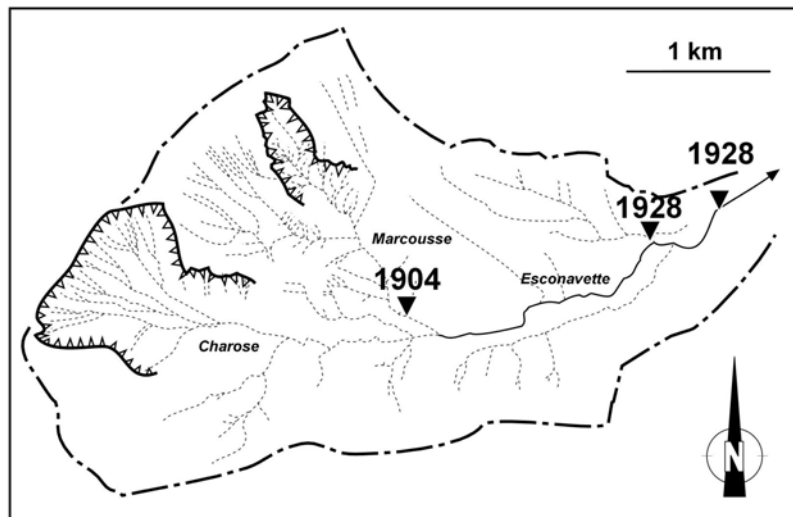


C

La BARNAVETTE



D








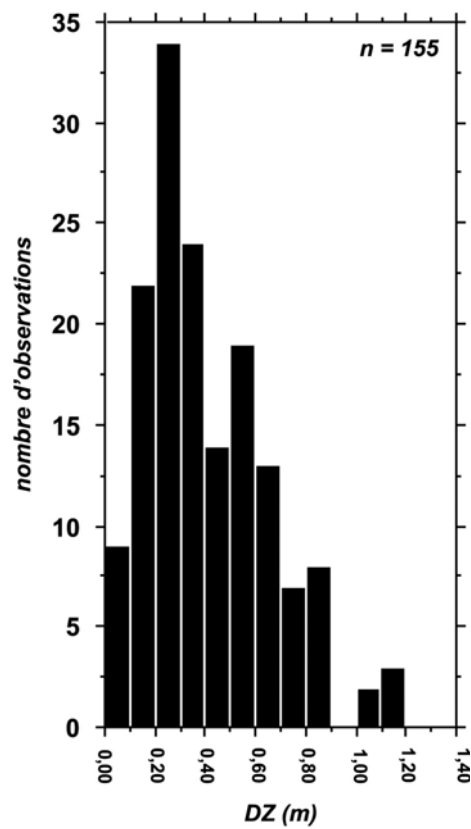
-  limites des bassins versants
-  réseau hydrographique d'ordre 5
-  têtes de bassin (ordre < 5)
-  dérochoirs
-  dates de signalement de l'enfoncement du lit (d'après les archives municipales)

Figure 55

Distribution des différences d'altitude entre le sommet des bancs et le fond du talweg (DZ) mesurées sur 159 profils en travers levés sur différents affluents préalpains ; n = nombre d'observations



Ces différents transects montrent que les anciennes surfaces actives de 1948 sont surélevées par rapport au fond du lit actuel. Les différences d'altitude sont comprises entre 0,61 et 2,44 mètres. Exception faite de la Béoux (transect 2), tous les sites présentent des surélévations supérieures à 1 mètre. La grande majorité des transects montrent également l'absence de sédiments fins sur les anciennes surfaces actives de 1948. Ces niveaux sont constitués d'alluvions grossières surmontées par une fine pellicule de débris végétaux. Seule la Béoux fait à nouveau exception à la règle. Ce constat nous conduit à considérer la surélévation de l'ancien lit de 1948 comme le résultat d'une incision rapide, et non pas comme la conséquence d'une construction de plaine alluviale par sédimentation fine de débordement.

Cette incision récente est confirmée par d'autres évidences de terrain : le déchaussement d'ouvrages d'art (Fig. 57A et 57B), l'excavation des systèmes racinaires, la mise en affleurement du substratum rocheux ou d'anciens dépôts quaternaires limoneux (Fig. 57C et 57D). Les 155 profils en travers levés sur l'ensemble des affluents étudiés permettent de donner quelques indications statistiques sur l'amplitude du phénomène. Les valeurs de profondeur moyenne, calculées en prenant comme niveau de base l'ancienne surface active de 1948, présentent une distribution de type log-normale (Fig. 58). L'incision moyenne est de 0,88 m, l'incision maximale est de 2,74 m et 90% des valeurs sont inférieures ou égales à 1,45 m.

Les anciennes surfaces actives de 1948 sont aujourd'hui occupées par une végétation de type forestière. Les différents transects étudiés permettent de caractériser la composition spécifique de ces boisements (Fig. 56). Nous avons indiqué pour chaque niveau topographique les principales espèces rencontrées. L'ancienne bande active de 1948 a été principalement colonisée par le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et le peuplier noir (*Populus nigra*). On y trouve également parfois du saule drapé (*Salix eleagnos*), comme sur la Béoux, l'Esconavette et la Barnavette. Toutes ces espèces ont un comportement pionnier de type mésoxérophile, ce qui signifie qu'elles peuvent coloniser des milieux relativement secs. Ceci est particulièrement vrai pour le pin sylvestre, très sensible à l'asphyxie induite par une inondation prolongée de son système racinaire. L'installation de cette espèce en milieu alluvial implique l'existence préalable de terrains secs et ouverts. Les atterrissements perchés par incision constituent donc des terrains tout à fait favorables à son implantation. Est-il cependant possible de considérer que cette espèce ne s'installe que lorsque un enfoncement du lit se produit ? Il faudrait étudier en détail les conditions critiques d'implantation du pin sylvestre en terme de proximité de la nappe pour répondre à cette question. Quoi qu'il en soit, aucun pin sylvestre n'a été observé sur les bancs de graviers inondables en cours de végétalisation. Même si ces terrains sont suffisamment secs en été pour permettre une installation des pins, la remontée du niveau des nappes à l'automne et au printemps semble être défavorable au maintien de cette espèce qui n'arrive à maturité qu'à 2 ans. Les rares sites au niveau desquels une colonisation par le pin sylvestre a été observée montrent tous sans exception un perchement des atterrissements. Ces différentes observations nous conduisent à considérer que le pins sylvestre

s'installe après qu'un certain seuil d'enfoncement ait été atteint. Le déclenchement du processus d'incision est donc antérieur à l'installation des pins. Ce constat est conforme aux observations réalisées à partir des anciens profils des Ponts-et-Chaussées qui montrent une incision dans des bancs de graviers non végétalisés.

Le cas de la Béoux cumule les particularités par rapport au modèle d'ajustement qui semble prévaloir sur les autres affluents. L'ancienne surface active de 1948 est faiblement surélevée par rapport au fond du lit actuel et elle est recouverte de sédiments fins, contrairement aux autres transects. Cette situation peut s'expliquer par un rehaussement récent du lit qui entraînerait une augmentation de la fréquence d'inondation des basses-terrasses. Nous avons d'ailleurs pu observer la mise en eau de cette surface et le dépôt consécutif d'une fine pellicule de limons lors d'une crue survenue le 8 mars 2001. Il faut cependant relativiser l'importance de cette sédimentation sur la genèse de cette surface, étant donné le caractère pelliculaire de la couche de limons et la présence du pin sylvestre qui indique plutôt une déconnexion hydraulique par incision.

Les transects permettent également de décrire l'agencement des différents niveaux topographiques présents dans le fond de vallée. Ces niveaux ont été numérotés sur chacun des profils en fonction (1) de leurs positions par rapport au fond du lit, (2) de leurs caractéristiques sédimentaires et (3) du type de végétation rencontré. On arrive ainsi à distinguer jusqu'à 3 surfaces, comme sur le Rif Miscon. L'ancienne bande active de 1948, appelée niveau N1, correspond généralement au premier niveau topographique, parfois au second, comme sur la Barnavette, la Bine, le Rif Miscon ou la Béoux. On observe sur ces quatre cours d'eau la présence d'un niveau intermédiaire entre le lit actuel et le niveau N1. Cette surface à sédimentation limoneuse, appelée niveau N0, est interprétée comme un lit majeur en cours de reconstruction. Elle présente une altitude relative comprise entre 0,50 et 1,40 mètres. On y trouve souvent de l'aulne blanc, espèce mésohygrophile, exigeante en terme d'humidité du sol. Ceci est confirmé sur la Béoux (transect 1) où nous observons une dynamique de colonisation végétale actuelle des bancs de graviers par l'aulne blanc. La genèse de cette surface fait suite à la formation par incision du niveau N1. Sur la Béoux (transect 2), elle se construit par végétalisation des bancs et alluvionnements successifs. Sur la Barnavette et le Rif Miscon, sa formation semble être plus complexe dans la mesure où sa dénivellation par rapport au fond du lit est plus conséquente et des espèces pionnières de type mésoxérophile y sont présentes. On y trouve exclusivement du pin sylvestre sur le Rif Miscon, tandis que sur la Barnavette, la composition floristique est nettement dominée par le saule drapé. Il est ainsi possible que l'incision ait joué ici un rôle non négligeable. Le transect établi sur la Barnavette met en évidence l'importance relative de cette sédimentation fine dans la constitution du niveau N0 (Fig. 59). Les accumulations limoneuses de surface présentent des épaisseurs comprises entre 13 et 38 cm, alors que la dénivellation moyenne est de 1,30 m par rapport au fond du lit actuel. Il faut donc faire intervenir un approfondissement du lit complémentaire de l'ordre du mètre.

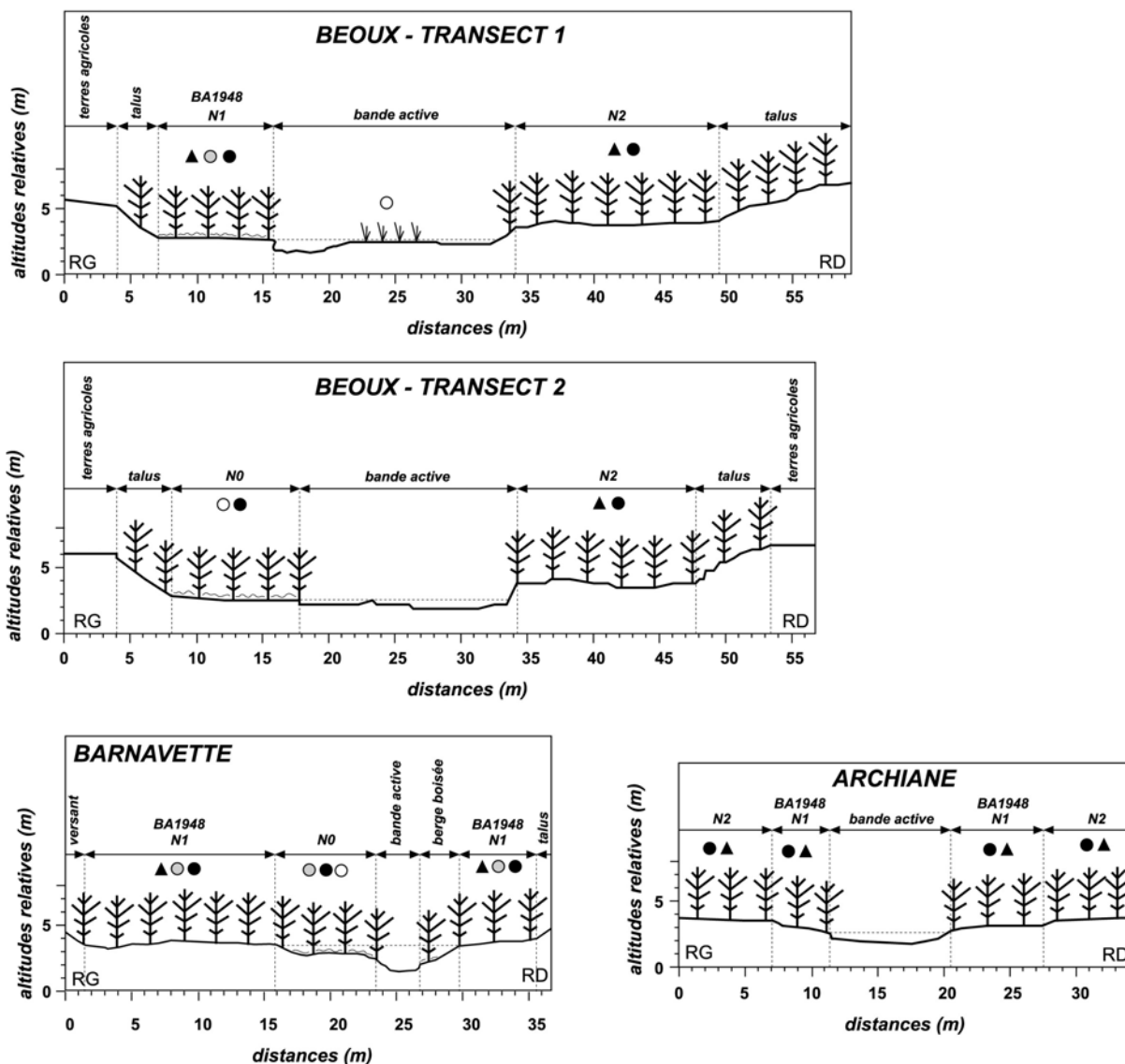
On distingue également sur certains transects la présence d'un niveau de graviers situé légèrement

au-dessus de l'ancienne bande active de 1948 (niveau N2). Ceci est le cas sur la Béoux, l'Archiane et le Rif Miscon. On y trouve essentiellement du pin sylvestre et du peuplier noir. Ce niveau supérieur doit être attribué à une phase d'incision ancienne, qui pourrait correspondre à celle mise en évidence à partir des anciens profils en travers des Ponts et Chaussées.

Les différentes techniques de datation mises en œuvre sur plusieurs sites amènent des éléments complémentaires d'analyse.

Figure 56

Exemples de profils en travers de fond de vallée levés sur quelques affluents ; les différents niveaux topographiques rencontrés ont été classés en fonction de leur origine; N0 : plaine alluviale, N1 : ancienne bande active de 1948, N2 et N3 : hautes terrasses ; RG : rive droite ; RG : rive gauche ; échelle : 1/5000^e



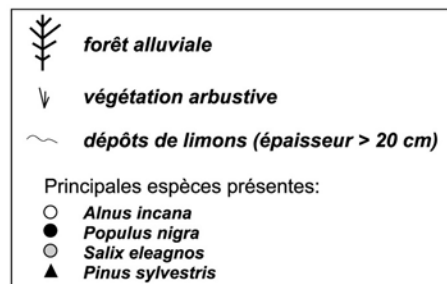
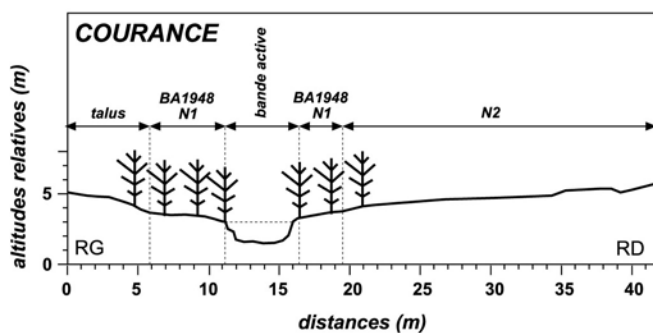
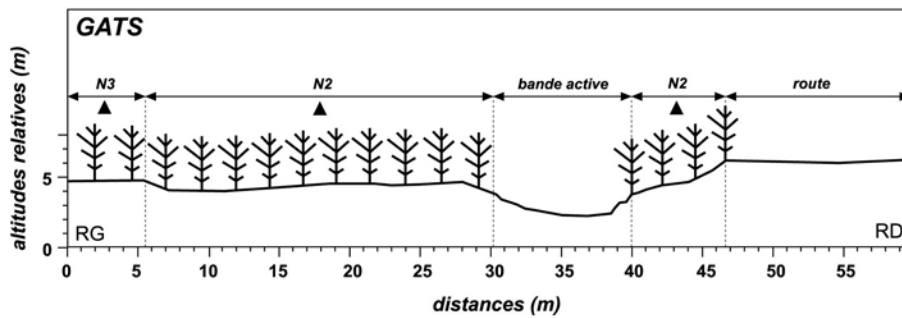
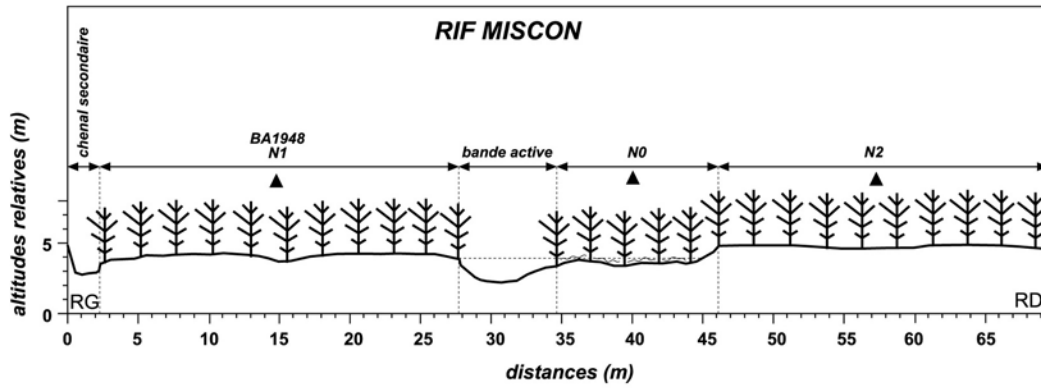
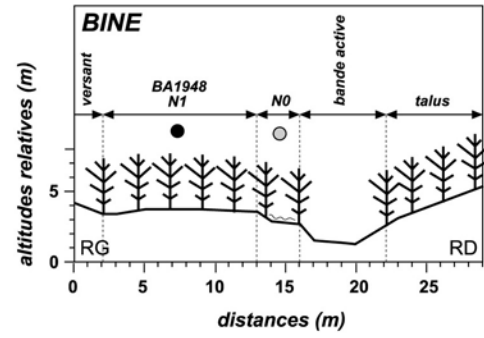
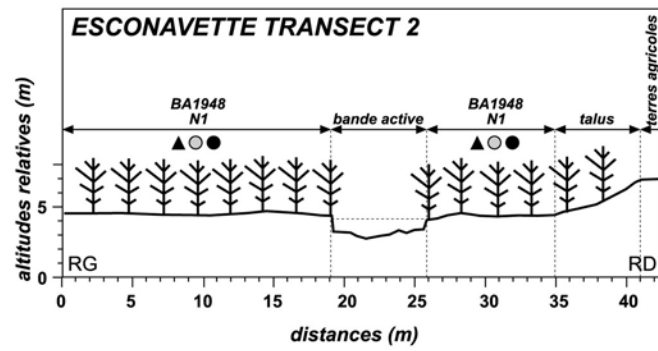
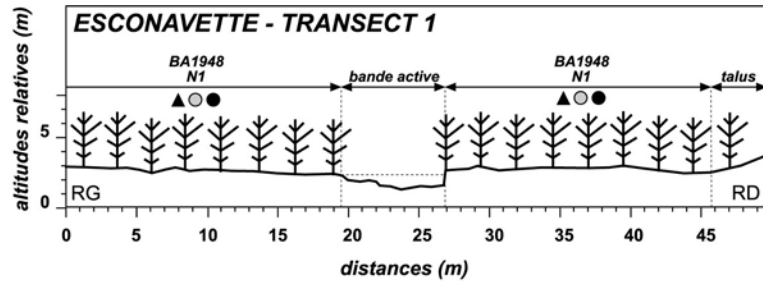




Figure 57

Quelques évidences d'incision récente observées sur différents affluents préalpains ; A : confortement d'anciennes digues déchaussées sur le Ruisseau de Marignac, mars 1999 ; B : déchaussement d'une pile de pont sur la Lidane, août 1998 ; C : mise en affleurement de vieux dépôts limoneux quaternaires sur l'Esconavette, juillet 1997 ; les basses terrasses visibles de part et d'autre du lit correspondent à la bande active des photographies aériennes de 1948 ; D : mise en affleurement du substratum marno-calcaire sur la Haute-Eygues, à l'amont de la confluence avec l'Armalause, août 1998 (clichés : FL)

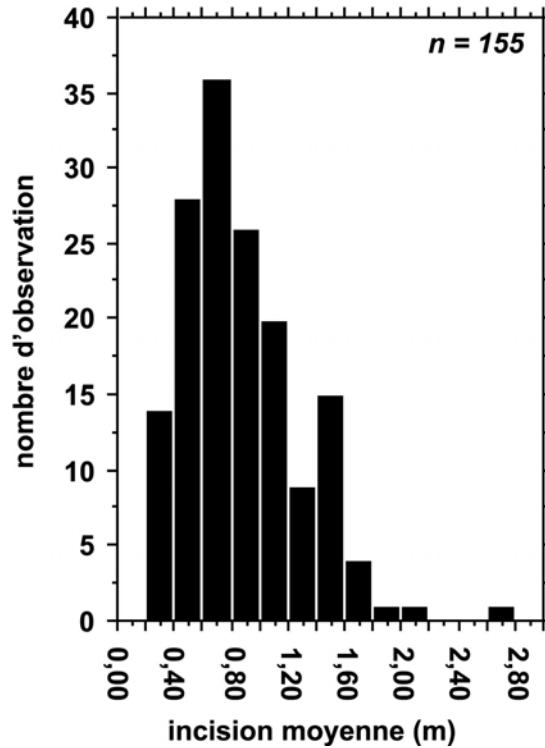


Figure 58
Distribution des valeurs d'incision moyenne obtenues sur les 155 profils en travers levés sur les affluents préalpins (n : nombre d'observations)

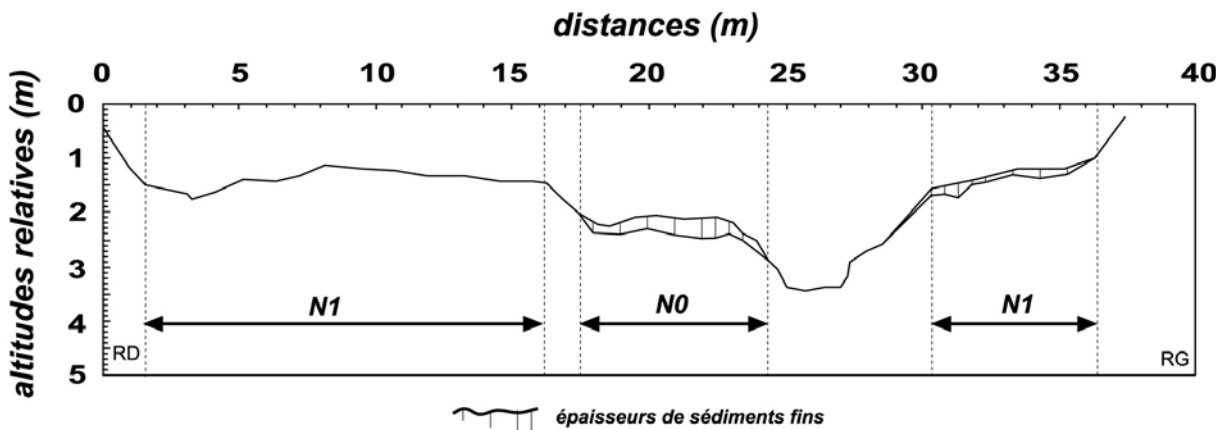


Figure 59
Profil en travers sur la Barnavette avec indications de l'épaisseur de la sédimentation fine sur les différents niveaux topographiques rencontrés ; N0 : plaine alluviale en cours de construction ; N1 : anciennes surfaces actives de 1948, aujourd'hui transformées en basses-terrasses

1.2.3.2. Les datations dendrochronologiques

Les relevés dendrochronologiques effectués sur les différents niveaux topographiques précédemment décrits permettent de donner des indications sur l'âge de ces surfaces (Fig. 60). Les résultats obtenus sur l'Archiane montrent que la forêt alluviale est bien plus vieille sur le niveau N2 par rapport au niveau N1. L'ancienne bande active de 1948 est occupée par des peupliers noirs et pins sylvestres dont l'âge moyen est de 34 ans ; les 13 individus échantillonnés sur le niveau N2 ont en moyenne 73 ans. Les hautes terrasses se seraient donc formées dans les années 1920, tandis que les basses terrasses dateraient des années 1960. Cette distinction chronologique ne peut être mise en évidence sur le Rif Miscon où nous observons une installation forestière simultanée sur les niveaux N1 et N2. Celle-ci s'opère dans les années 1950. Les datations effectuées sur le niveau N0 montrent qu'il s'est végétalisé dans les 1970. Sur la Béoux, le niveau N2 s'est boisé dans les années 1950, le niveau N1 dans les années 1970 et le niveau N0 au début des années 1980. Le cas de la Barnavette présente des résultats similaires à ceux obtenus sur la Béoux.

Lorsque nous regroupons l'ensemble des datations obtenues sur les sites aval, nous obtenons des âges bien différenciées entre les trois niveaux topographiques (Fig. 60, Tab. 16). L'installation forestière du niveau N0 s'échelonne entre la fin des années 1960 et la fin des années 1980. Aucun individu de plus de 35 ans n'y a été observé. Le boisement de l'ancienne bande active de 1948 est beaucoup plus dispersé dans le temps, puisqu'il s'opère entre le début des années 1940 et la fin des années 1980. Le niveau N2 présente également des individus aux âges dispersés. L'installation forestière se manifeste entre le début des années 1910 (un pin sylvestre de 93 ans a été observé sur l'Archiane) et la fin des années 1960. Cette dispersion peut être interprétée comme le résultat des pressions anthropiques sur les boisements de rivières, qui sont restées fortes jusqu'à la fin des années 1950. Ceci pourrait expliquer localement une installation forestière tardive sur les hautes terrasses, sans véritable relation avec l'évolution morphologique des lits fluviaux.

Tableau 16

Description statistique des datations dendrochronologiques effectuées sur les différents niveaux topographiques rencontrés sur plusieurs affluents (Archiane, Barnavette, Béoux, Esconavette, Gâts, Rif Miscon, Soubriion)

	Niveau N0	Niveau N1	Niveau N2
Age moyen (ans)	23,27	31,82	57,07
Intervalle de confiance à 95%*	[21,71 ; 24,82]	[30,04 ; 33,60]	[53,19 ; 60,95]
Age maximum (ans)	35	64	93
Age minimum (ans)	14	15	29

* déterminé à partir d'un test T sur échantillons non appariés

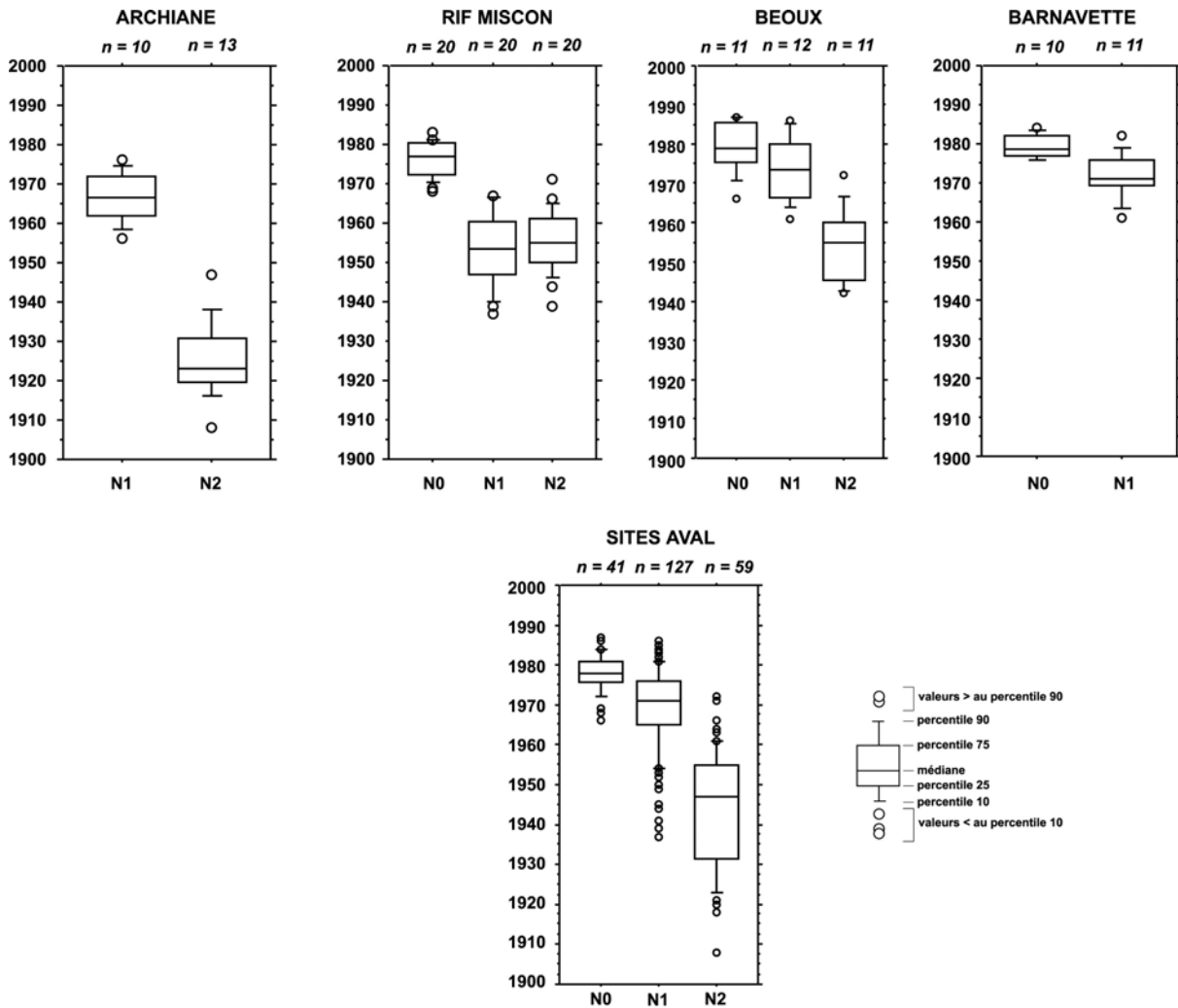


Figure 60

Dates d'installation de la forêt alluviale sur les différents niveaux topographiques du fond de vallée ; N0 : plaine alluviale en cours de construction ; N1 : basses terrasses (ancienne bande active de 1948) ; N2 : hautes terrasses ; n : nombre d'observations ; sites aval : ensemble des datations obtenues sur les transects aval de l'Archiane, l'Esconavette, la Barnavette, la Béoux, le Rif Miscon, les Gâts et le Soubriou

Les comparaisons des âges dendrochronologiques obtenus entre les sites étudiés au sein d'un même cours d'eau sont révélatrices des différences de l'installation forestière entre l'amont et l'aval. La végétalisation de l'ancienne bande active de 1948 est plus précoce à l'amont qu'à l'aval (Fig. 61, Tab. 17). Une ANOVA complétée par un test de Scheffé montre que les âges des arbres sont significativement plus vieux sur les sites amont (Tab. 18). La figure 62 permet de visualiser l'âge de la forêt alluviale en fonction de la distance aux sources sédimentaires principales. Elle regroupe l'ensemble des sites sur lesquels nous avons pu dater les arbres présents sur l'ancienne surface active de 1948. Les nuages de points s'organisent à l'intérieur de courbes-enveloppes qui montrent clairement un vieillissement des forêts vers l'amont. Il faut cependant noter la dispersion de certains sites, notamment celui étudié sur l'Esconavette, qui se caractérise par une forêt jeune compte tenu de sa position longitudinale. Cette jeunesse pourrait être liée à une exploitation récente des boisements pionniers.

Les relevés effectués sur la Barnavette montrent que le boisement de l'ancienne bande active de 1948 présente un décalage de 22 ans entre les sites amont et aval. Si nous faisons l'hypothèse d'une installation forestière continue et progressive depuis l'amont, en relation avec un phénomène de déficit sédimentaire qui se propage vers l'aval, nous obtenons une progression annuelle de 245 mètres. Les valeurs obtenues sur l'Esconavette, le Soubrion et la Sure sont respectivement de 226, 433 et 500 mètres. Le regroupement de tous les sites de mesure montre que ces gradients oscillent entre 300 et 500 m an⁻¹ (Fig. 62).

Tableau 17

Résultats des relevés dendrochronologiques amont-aval effectués sur la Barnavette, l'Esconavette, le Soubrion et la Sure

Sites	Cours d'eau	Distance aux sources (m)	Age moyen (ans)	Intervalle de confiance (95%)*	Age maximum (ans)
BAR1	Barnavette	6360	29,95	[27,57 ; 32,34]	40
BAR2	Barnavette	4770	29,09	[25,18 ; 33,00]	40
BAR3	Barnavette	1270	50,00	[45,44 ; 54,56]	66
BAR4	Barnavette	1730	51,60	[47,37 ; 55,83]	71
ESC1	Esconavette	4310	29,40	[25,78 ; 33,03]	46
ESC2	Esconavette	3240	19,30	[16,73 ; 21,87]	27
ESC3	Esconavette	1280	42,80	[35,51 ; 50,09]	67
SOU1	Soubrion	5950	29,68	[27,28 ; 32,08]	40
SOU2	Soubrion	1170	40,71	[36,11 ; 45,31]	55
DS1	Sure	15700	31,37	[29,28 ; 33,45]	39
DS2	Sure	12460	35,30	[33,55 ; 37,05]	48
DS3	Sure	6670	47,33	[39,57 ; 55,10]	64
DS4	Sure	3240	37,42	[34,56 ; 40,28]	48
DS5	Sure	2130	42,37	[37,44 ; 47,29]	61
DS6	Sure	860	59,53	[54,11 ; 64,96]	90

Tableau 18

Résultats du test de Scheffé permettant de comparer l'âge des arbres du niveau N1 entre les différents sites de mesure établis le long de la Barnavette, de l'Esconavette et du Soubrion (en gras : différence significative de moyenne au niveau de confiance 95 % ; la localisation des sites est présentée en Figure 39)

La BARNAVETTE					
	BAR1	BAR2	BAR3		
BAR2	0,9912				
BAR3	< 0,0001	< 0,0001			
BAR4	< 0,0001	< 0,0001	0,9396		
L'ESCONAVETTE					
	ESC1		ESC2		
ESC2	0,0285				
ESC3	0,0007		< 0,0001		
La SURE					
	SD1	SD2	SD3	SD4	SD5
SD2	0,8144				
SD3	0,0017	0,0537			
SD4	0,4949	0,9951	0,2742		
SD5	0,0087	0,2937	0,9268	0,8137	
SD6	< 0,0001	< 0,0001	0,0475	< 0,0001	< 0,0001
Le SOUBRION					
	SOU1				
SOU2	< 0,0001				

Première Partie: Les changements fluviaux contemporains dans leur environnement

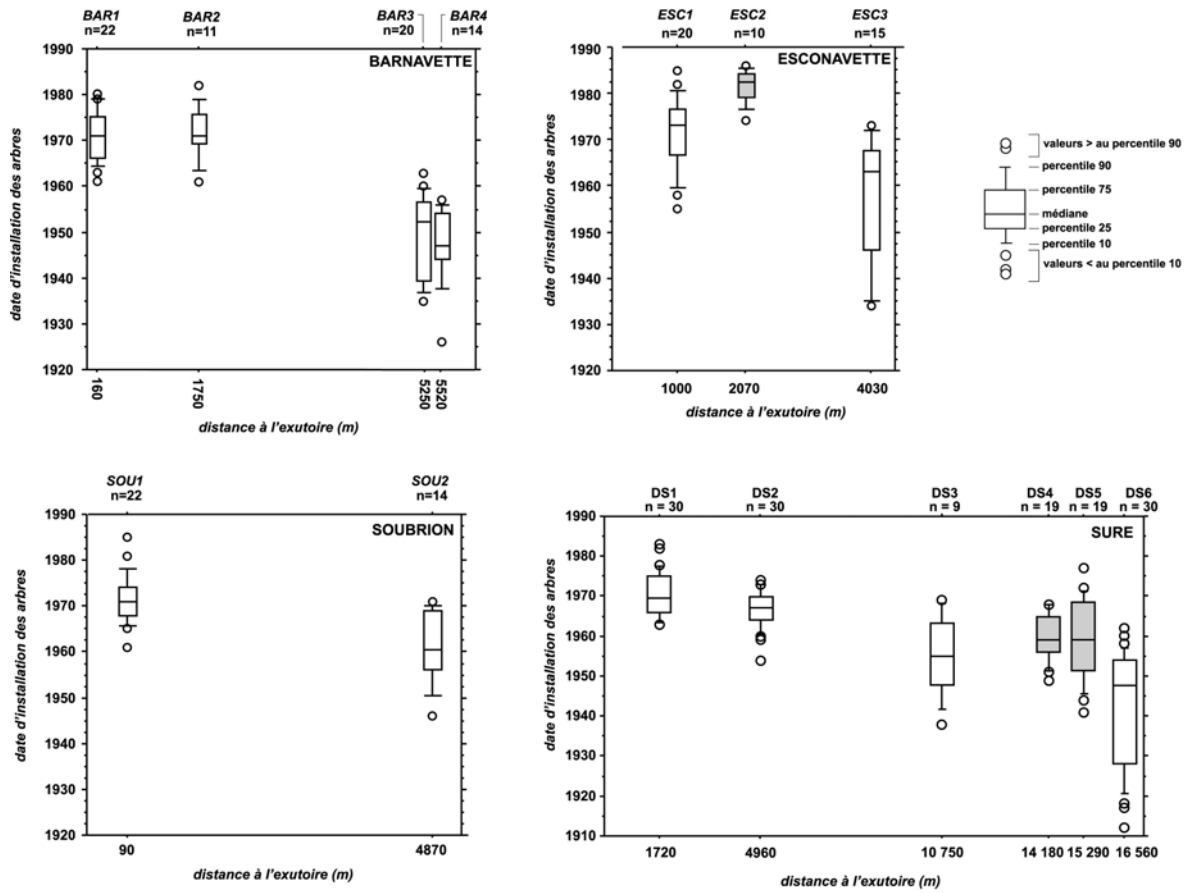


Figure 61

Dates d'installation de la forêt alluviale dans l'ancienne bande active de 1948 (niveau N1) en fonction de la distance à l'exutoire ; n = nombre d'observations ; les boîtes en trame de gris correspondent aux sites anthropisés

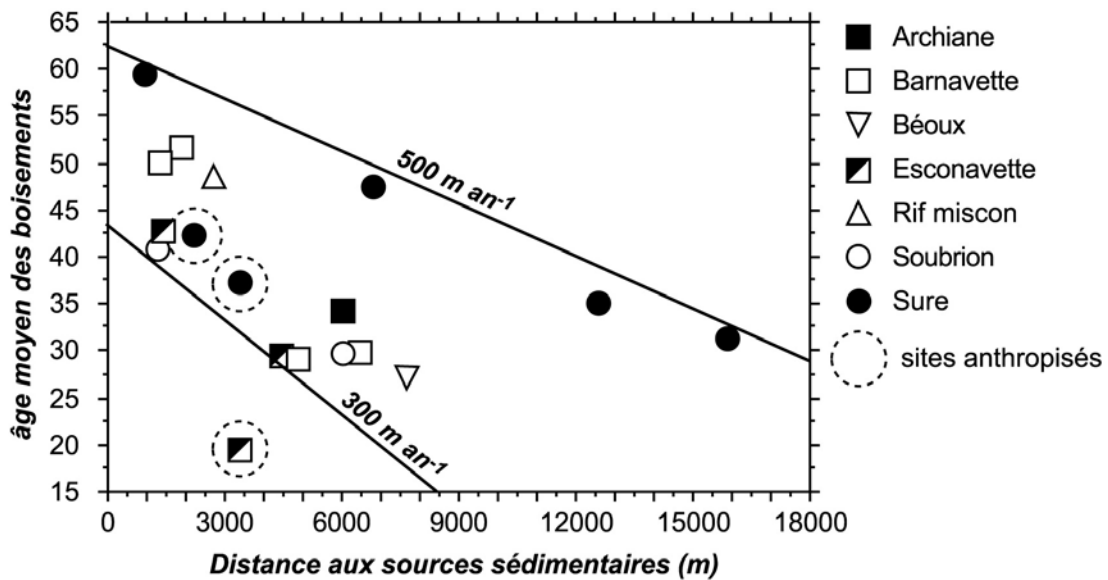


Figure 62

Relation entre l'âge de la forêt alluviale installée sur l'ancienne bande active de 1948 et la distance aux sources sédimentaires ; les courbes-enveloppes correspondent aux gradients de progression vers l'aval des vagues d'incision progressive induites par le tarissement des sources sédimentaires

1.2.3.3. Les datations radiométriques

L'inventaire de l'activité du césium 137 et du plomb 210 non supporté d'un profil de sol est à la fois fonction des retombées atmosphériques et de la redistribution des radioéléments dans le paysage induite par les phénomènes d'érosion, de transport et de dépôt des sédiments fins ayant incorporé ces particules radioactives. La comparaison des inventaires entre sites permet de détecter et de mesurer les pertes ou les gains sédimentaires ayant affecté chaque site. Le principe de la méthode est de comparer l'activité radiométrique totale mesurée sur des terrains potentiellement soumis à l'action des agents morphogéniques avec l'activité mesurée sur des sites de référence non perturbés [Walling *et al.*, 1996].

Les mesures radiométriques effectuées sur les basses-terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette ont été comparées avec les teneurs mesurées sur plusieurs sites de référence localisés dans le haut bassin de la Drôme (Tab. 19) [Piégay *et al.*, sous presse]. Ils se composent de 5 carottes échantillonnées sur des terrains cultivés ou mis en pâtures. Les résultats montrent que les flux mesurés sur les basses terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette sont inférieurs aux teneurs des inventaires de référence. D'autre part, les flux de plomb 210 non-supporté enregistrés dans les sédiments, qui sont respectivement pour l'Esconavette et la Barnavette de 39 et 68 Bq m⁻² an⁻¹, sont nettement inférieurs au flux atmosphérique qui caractérise les Alpes françaises (110 Bq m⁻² an⁻¹) [Preiss *et al.*, 1996]. Ces résultats peuvent s'expliquer soit (1) par des pertes importantes sous l'effet de la diffusion en profondeur, soit (2) par l'exportation d'une partie des radioéléments sous l'effet du transport solide lors des crues, soit (3) par un potentiel d'incorporation plus faible lié à une granulométrie plus grossière. La configuration générale des profils d'activité du césium 137 et du plomb 210 exogène obtenus sur les 2 sites de mesure montrent que la totalité des radioéléments sont contenus dans les 20 premiers centimètres du profil (Fig. 63). Nous n'observons pas de pics de concentration en profondeur, qui laisseraient entrevoir une diffusion importante des sédiments fins au-delà de 40 cm. Il faut donc plutôt considérer soit des pertes induites par la mise en mouvement du sédiment lors des crues, soit de faibles concentrations liées à la granulométrie de la matrice. La première hypothèse conduit à admettre que ces surfaces aujourd'hui stabilisées ont connu une activité géomorphologique au-moins jusque dans les années 1960, période pendant laquelle les retombées atmosphériques de césium 137 ont été les plus fortes. Les inventaires radiométriques déficitaires suggèrent en effet une remobilisation du saupoudrage atmosphérique par l'érosion et le dépôt d'une couche active de surface lors des crues et donc une stabilisation des basses terrasses postérieure à 1964 (pic des retombées atmosphériques de césium 137 lié aux essais nucléaires). Bien que ce résultat soit conforme aux datations dendrochronologiques effectuées sur les sites aval de l'Esconavette et de la Barnavette, qui mettent en évidence une colonisation forestière dans les années 1970, il faut émettre des réserves liées à la granulométrie relativement grossière de la matrice. Les relevés radiométriques ne permettent pas de à eux-seuls de déterminer avec certitude l'âge des basses terrasses.

Tableau 19

Inventaires des flux de césium 137 et de plomb 210 non supporté mesurés sur les basses-terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette et sur les sites non perturbés de la Haute-Drôme (inventaires régionaux de référence)

Sites	^{137}Cs (mBq cm $^{-2}$)	^{210}Pb (mBq cm $^{-2}$)
Esconavette	230	125
Barnavette	422	220
Carottes de référence*	495	398

* moyenne des échantillonnages sur sites non perturbés effectués dans le haut bassin de la Drôme [Piégay *et al.*, sous presse]

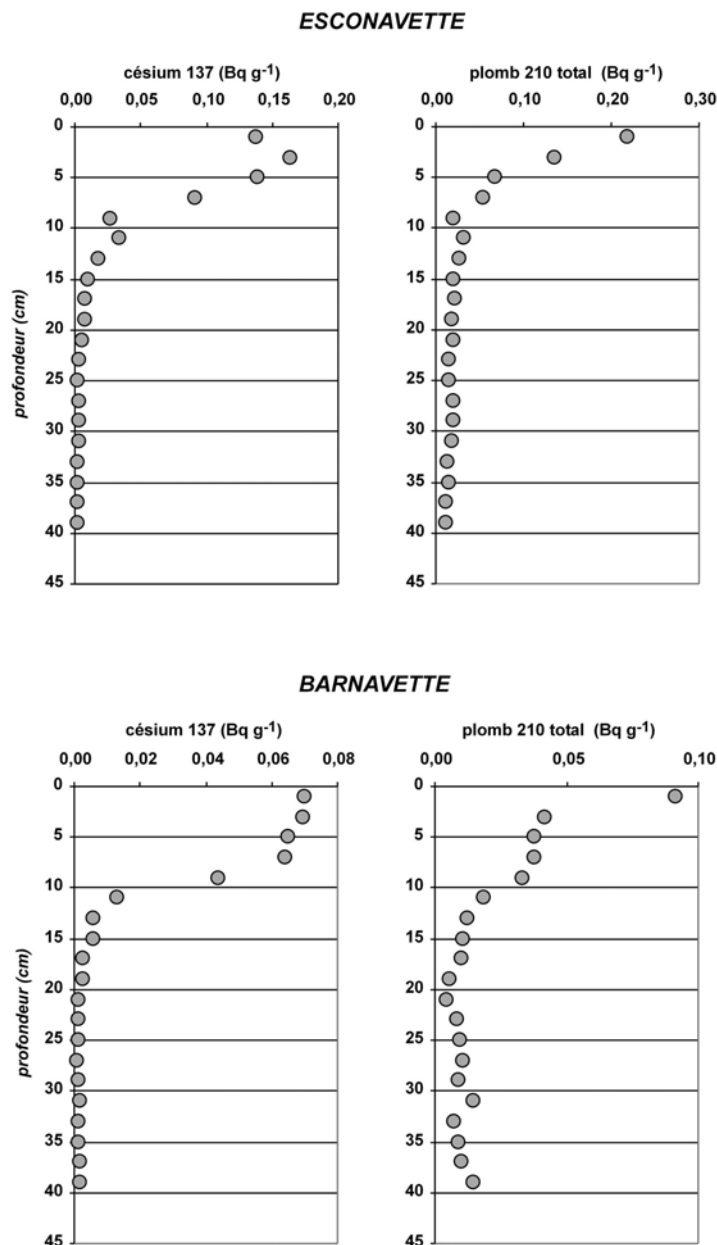


Figure 63

Profils d'activité radiométrique du césium 137 et du plomb 210 total obtenus sur les basses terrasses de l'Esconavette et de la Barnavette (anciennes surfaces actives de 1948)

1.3. Synthèse sur les changements fluviaux contemporains

Les principaux affluents des grandes rivières drômoises ont subi de profondes transformations morphologiques à l'échelle des 150 dernières années. Les anciens plans de cours d'eau du 19^e siècle et les différentes missions aériennes de la seconde moitié du 20^e siècle mettent en évidence la rétraction des bandes actives. Là où autrefois se dessinaient de grandes bandes de tressage qui occupaient parfois la totalité du fond de vallée, s'écoulent aujourd'hui des ruisseaux étroits et confinés, qui cheminent au travers d'une plaine moderne souvent boisée. Cette métamorphose, dont la tendance ne semble pas avoir été interrompue, ou du moins inversée, depuis la dernière séquence de crise géomorphologique dite du Petit Age Glaciaire, ne s'est pas déroulée de façon progressive. Les courbes d'évolution des largeurs montrent un ajustement accéléré dans les années 1950 et 1960. Ces données sont confirmées par les relevés dendrochronologiques qui mettent en évidence une dynamique de stabilisation des bandes actives à partir des années 1940 pour les individus les plus anciens. Ce phénomène récent est observé également sur un grand nombre de rivières de montagne méditerranéennes : l'Arno en Toscane [Billi et Rinaldi, 1997] ; la Figarella et le Fiume Seccu en Corse [Gaillot et Piégay, 1999] ; le bassin de l'Aragon dans les Pyrénées espagnoles [Garcia-Ruiz *et al.*, 1997] ; la rivière Piave en Italie du Nord [Surian, 1999], le bassin de la Durance [Gautier, 1992; Miramont et Guilbert, 1997], l'Ardèche et l'Ouvèze [Piégay, 1995]. Même s'il est surprenant de constater l'ampleur géographique de la rétraction, il faut se garder de proposer une explication commune dans la mesure où chaque cas étudié présente des spécificités en terme d'aménagement fluvial. La régulation hydrologique et la rétention sédimentaire consécutives à la mise en place de grands barrages explique dans bien des cas la contraction des bandes actives [Surian, 1999; Warner, 2000]. L'endiguement forcené des cours d'eau peut conduire également à diminuer artificiellement la largeur du lit sur un linéaire important [Billi et Rinaldi, 1997]. L'intérêt des petites rivières torrentielles étudiées tient entre autre à l'absence de ces grands aménagements, ce qui offre l'opportunité d'évaluer avec plus d'acuité l'influence d'autres éléments d'explication souvent évoqués, comme la reconquête forestière des versants, la correction torrentielle ou l'évolution des crues et du climat.

La variabilité régionale de la rétraction a été étudiée à partir d'une cartographie des taux de rétraction et de comparaisons inter-bassins. Les résultats obtenus ne montrent pas de différences significatives entre les affluents de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion. Ces 3 bassins ont subi le même phénomène, dans des proportions sensiblement identiques. Même s'il existe une variabilité du taux de rétraction entre les affluents, aucun regroupement régional n'a pu être identifié de façon claire. Il faut signaler cependant quelques cas particuliers : la Haute-Drôme, qui se caractérise par une bande active globalement stable depuis 1948 ; certains affluents de l'Eygues qui continuent à se rétracter après 1970, alors que la plupart des autres rivières étudiées se sont stabilisées à cette date.

Les structures longitudinales du changement à l'intérieur d'un même bassin montrent que la rétraction affecte l'ensemble du linéaire hydrographique. Nous observons cependant sur certains cours d'eau le maintien préférentiel de bandes de tressage résiduelles à l'aval. Les datations dendrochro-

nologiques montrent une rétraction qui progresse depuis l'amont avec une installation forestière plus précoce à proximité des sources sédimentaires. Dans les hauts bassins, elle s'est produite autour des années 1950, alors que sur les sites aval, elle démarre véritablement dans les années 1970. Ce gradient d'installation forestière permet de proposer des vitesses de migration vers l'aval de l'incision comprises entre 300 et 500 m an⁻¹. Ces valeurs sont plus fortes que celles obtenues dans le bassin versant de Glandage où la dendrochronologie a révélé des vitesses de progression de l'ordre de 100 m an⁻¹ vers l'aval [Thévenet, 2001]. Ce résultat se rapproche de celui obtenu sur l'Esconavette à partir des archives municipales. Toutes ces estimations s'accordent avec la gamme des déplacements annuels observés dans les études relatives aux migrations des vagues sédimentaires. Ceux-ci augmentent généralement en fonction de la taille des rivières et la plupart des valeurs sont comprises entre 100 et 500 m an⁻¹ pour les organismes de taille modeste [Nicholas *et al.*, 1995; Beechie, 2001].

Le synchronisme des boisements de fond de vallée, présenté comme un élément déterminant dans l'explication des causes de la rétraction des grands cours d'eau [Piégay, 1995; Liébault et Piégay, 2002] ne s'applique pas aux petites rivières torrentielles des montagnes drômoises. Les échantillonnages dendrochronologiques stratifiés par niveaux topographiques mettent en évidence des différences d'âges entre l'amont et l'aval et entre les différents niveaux rencontrés. Ces signatures morphologiques sont parfois perturbées par la mise en valeur agricole et l'exploitation ponctuelle des forêts riveraines. Ceci peut expliquer la relative jeunesse de certains peuplements, eu égard à leur position morphologique.

Les différents transects levés sur les sites rétractés révèlent l'absence de sédimentation fine sur les anciennes portions de bande active abandonnées, ce qui nous conduit à réfuter l'hypothèse d'une contraction associée à une construction de plaine alluviale. Ce type d'ajustement a été décrit sur de nombreuses rivières et il est souvent interprété comme un processus de rétablissement géométrique faisant suite à de fortes crues ou à des périodes d'abondance hydrologique [Schumm et Lichty, 1963; Williams, 1978; Martin et Johnson, 1987; Allred et Schmidt, 1999; Grams et Schmidt, 2002]. L'ajustement morphologique observé sur les affluents drômois s'apparente plus à une édification de basses terrasses consécutive à l'incision d'un chenal étroit. La végétation qui s'est installée sur les anciennes portions de bande active présente un comportement pionnier de type mésoxérophile, ce qui indique une nappe phréatique relativement profonde lors de la colonisation végétale et confirme une déconnexion préalable par incision rapide. La rapidité avec laquelle s'est propagée l'incision progressive peut s'expliquer par la vigueur des pentes observées sur ces cours d'eau. Celles-ci peuvent atteindre 3 à 4% dans les tronçons amont. Certains profils en travers du début du siècle montrent clairement l'incision de ruisseaux dans des bancs de graviers non végétalisés, aujourd'hui conservés sous forme de terrasses. Ce type d'ajustement est similaire à celui observé dans les Pyrénées espagnoles, où la formation de basses terrasses récentes est mise en relation avec la reconquête forestière et arbustive des versants [Garcia-Ruiz *et al.*, 1997; Gomez-Villar et Garcia-Ruiz, 2000]. Les travaux de Germanoski et Harvey [1993] mettent également en évidence la formation de terrasses

consécutive au reboisement spontané des versants, dans un contexte de moyennes montagnes semi-aride (*Mazatzal Mountains, Arizona*). Une phase d'incision rapide s'est propagée depuis l'amont après le rétablissement progressif de la couverture végétale, entièrement détruite par un incendie naturel en 1959. L'incision s'est développée au sein d'une grande bande de tressage, construite par les apports solides successifs des crues qui ont suivi l'incendie et progressivement colonisée depuis l'amont par la végétation.

Les changements morphologiques qui ont affecté les rivières torrentielles drômoises présentent ainsi de nombreuses similitudes avec les réponses fluviales faisant suite à un tarissement des sources sédimentaires. Est-il possible de mettre en évidence des changements environnementaux contemporains susceptibles d'avoir modifié l'étendue ou le fonctionnement des zones de production sédimentaire des Préalpes du Sud ? Tel est l'objet des développements qui suivent.

2. Les changements de l'environnement

Après avoir analysé en détail les principaux ajustements géométriques contemporains qui ont affecté les rivières torrentielles d'étude, nous proposons une investigation des changements du milieu susceptibles d'expliquer cette évolution. Nous aborderons successivement les changements de l'occupation du sol, l'historique de la correction torrentielle et l'évolution hydrologique séculaire. Ces trois thèmes constituent les principaux paramètres de contrôle des flux liquides et solides qui sont susceptibles d'évoluer au cours du temps et d'induire une métamorphose fluviale à l'échelle de temps séculaire (Fig. 64). Les changements climatiques peuvent modifier les flux liquides et solides par le biais des impulsions pluviométriques événementielles. Le climat détermine la fréquence et l'intensité de ces événements. Les attributs biophysiques du bassin versant, que nous avons désigné sous le terme de potentiel hydro-géomorphologique, contrôlent la réponse des lits fluviaux à ces perturbations. Ce potentiel est défini par un certain nombre de caractéristiques, parmi lesquelles la couverture végétale tient une place importante. Celle-ci est soumise à l'action de l'homme, qui peut, volontairement ou non, modifier sa composition et sa répartition spatiale. L'aménagement des bassins versants ou des lits fluviaux influence également ce potentiel. La politique de correction torrentielle conduite dans les Alpes françaises à partir de la fin du 19^e siècle en constitue un exemple remarquable, bien que ses effets sur l'évolution de la torrentialité soient parfois sujet à caution [Blanchard, 1945; Gautier, 1992]. Les sociétés humaines sont également susceptibles de modifier directement les flux liquides et le transport solide des rivières. L'impact des barrages et des extractions de matériaux sur les formes et les processus fluviaux est un thème bien documenté [Williams, 1978; Galay, 1983; Harvey et Schumm, 1987; Collins et Dunne, 1989; Kondolf, 1994; Kondolf, 1997a]. Ces perturbations directes sont peu importantes sur nos rivières d'étude, hormis les curages qui ont pu avoir une influence locale sur l'évolution des lits. Ceci nous permet de mieux évaluer l'influence des variables de contrôle indirectes.

2.1. Correction torrentielle et changements de l'occupation du sol

2.1.1. Historique et bilan de la Restauration des Terrains en Montagne

Comme la plupart des zones de montagne du territoire français, les massifs du Diois et des Baronnies ont fait l'objet d'importants travaux de lutte contre l'érosion entre la fin du 19^e et le début du 20^e siècle. Ces aménagements, programmés à l'échelle nationale par une série de lois, la principale étant celle du 4 avril 1882 relative à la Restauration des Terrains en Montagne (RTM), furent pris en charge par l'administration des Eaux et Forêts. Notre objectif est ici de présenter l'histoire et la géographie de la RTM des bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion. Seront présentés successivement, le type, la chronologie et la répartition spatiale des travaux réalisés.

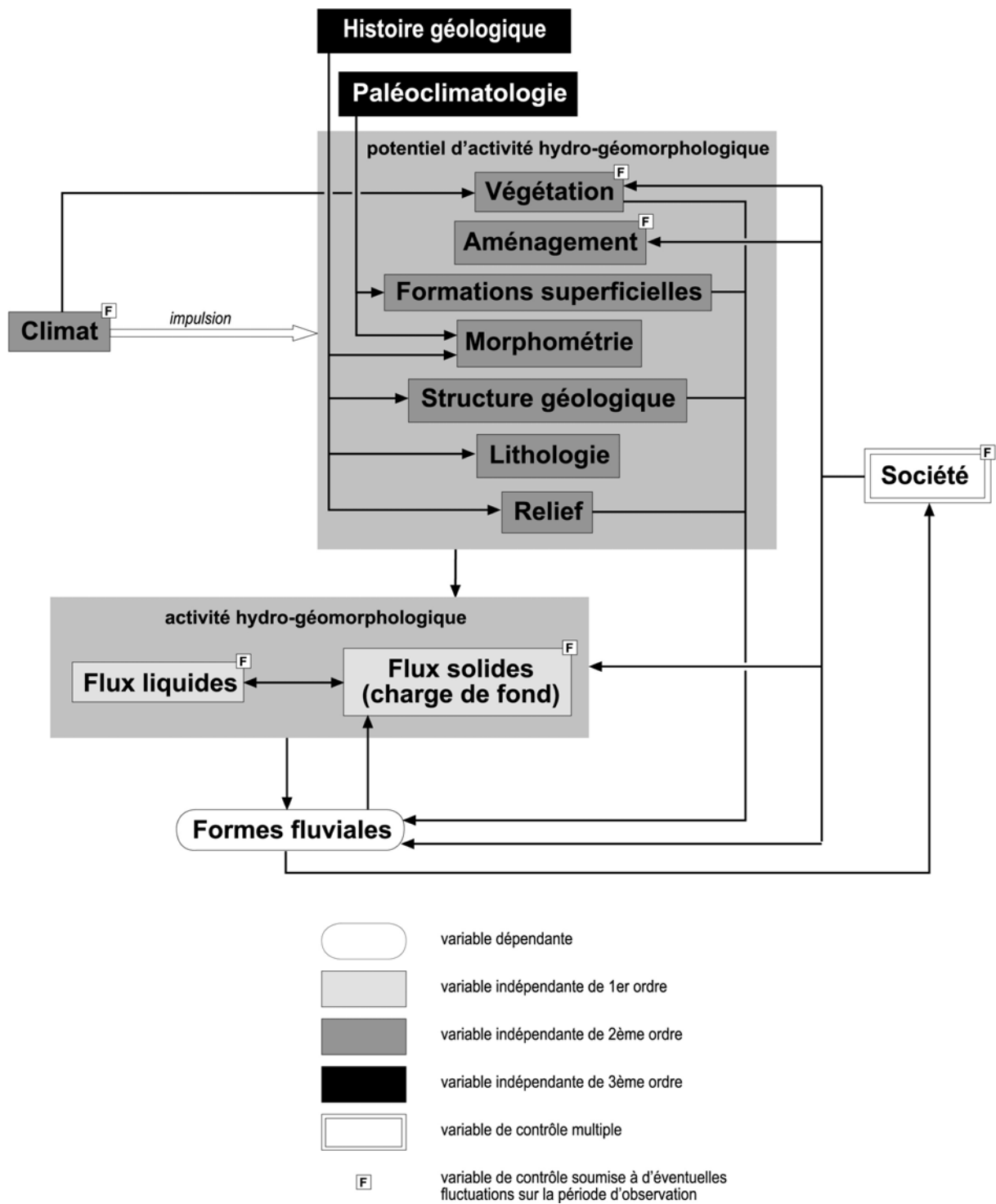


Figure 64

Le système fluvial appréhendé à l'échelle historique (10-100 ans) ; hiérarchisation des relations entre les différents types de variables impliquées dans le fonctionnement du système [inspiré de Schumm et Lichty, 1965, cité par Petts et Bravard, 1993]

2.1.1.1. *État de la question*

Pour comprendre l'émergence de la politique de correction torrentielle à la fin du 19^e siècle, il faut considérer un contexte historique et géomorphologique particulier, marqué par la conjonction entre une période de recrudescence de la torrentialité et une nouvelle forme d'organisation du territoire, à l'origine d'une prise de conscience relativement tardive des problèmes d'érosion.

La dernière phase de recrudescence de la torrentialité dans les Alpes françaises démarre véritablement à partir du 15^e siècle et perdure jusque vers la fin du 19^e siècle. Cette période de crise est la conséquence directe des fortes crues du Petit Age Glaciaire (1450-1850) qui se sont produites dans un contexte de bassins versants dont la couverture végétale a été fragilisée par une surexploitation agro-pastorale [Douguedroit, 1980; Jorda, 1985; Neboit, 1991]. Les textes anciens décrivent le réveil des torrents qui a connu son paroxysme aux 18^e et 19^e siècles. Les cônes de déjections, autrefois utilisés comme lieux d'habitation privilégiés, notamment dans les Alpes du Nord, se sont réactivés du fait de l'occurrence à intervalles courts de laves torrentielles dévastatrices. Cette modification du fonctionnement des torrents s'est accompagnée de transformations fluviales en plaine, liées aux injections massives de matériaux dans les drains principaux. Une véritable métamorphose fluviale caractérise ainsi la plupart des rivières des Alpes françaises durant cette période [Bravard et Peiry, 1993]. Les lits se sont exhausés et élargis de façon significative, engendrant ainsi des contraintes majeures pour les communautés riveraines. Le risque d'inondation et l'instabilité latérale des cours d'eau se sont aggravés. Cette situation est devenue d'autant plus préoccupante pour l'administration française que cette crise torrentielle coïncide avec l'implantation de voies de communications modernes dans les fonds de vallée et l'apparition conjointe de nouvelles exigences de sécurisation des infrastructures [Fourchy, 1966]. Ce fut le cas du Diois, avec l'ouverture de la voie ferrée vers la frontière italienne en 1894, qui conféra à cette région un rôle stratégique. De nombreux travaux de correction torrentielle lui sont d'ailleurs directement associés. La mise en place progressive de l'administration napoléonienne au 19^e siècle va également permettre une prise de conscience du problème de l'érosion, qui n'est pas un fait nouveau à cette époque [Fourchy, 1966].

Les grandes crues des années 1840 et 1850, notamment dans le bassin du Rhône, ont eu un impact important sur l'opinion publique, et sont venu accréditer les thèses de Surell [1841] sur l'influence néfaste du déboisement des montagnes sur le régime des eaux. La réaction des pouvoirs publics a été relativement rapide puisque dès 1860, une loi est votée sur le reboisement des montagnes (la loi du 28 juillet 1860). L'objectif est clairement défini : la lutte contre l'inondation passe par le reboisement des montagnes, déclaré d'utilité publique. La charge de la réalisation des travaux incombe aux propriétaires. Face aux nombreux ressentiments des populations locales qui se trouvent dans l'obligation de céder leur terrain de parcours à l'État compte tenu du coût élevé des travaux, une nouvelle loi plus libérale est votée le 8 juin 1864, permettant de substituer le gazonnement au reboisement là où ce dernier s'avérait trop difficile ou inopportun. Des indemnités pour privation temporaire de droit de pâturage sont également prévues pour les communes.

Ces mesures compensatrices étant jugées insuffisantes, le mécontentement des populations locales perdure et conduit à l'adoption d'une nouvelle loi, la loi du 4 avril 1882 relative à la restauration et la conservation des terrains en montagne. Par rapport aux lois antérieures, le domaine de l'utilité publique se trouve rétréci aux zones d'érosion active, là où le danger est né et actuel [Poncet, 1985]. Cette révision de l'espace d'intervention, impliquant une réduction des périmètres de correction et une restitution gratuite de terrains aux anciens propriétaires, marque également une réorientation de la loi vers le traitement du risque rapproché. Le souhait d'une meilleure adhésion des populations locales est affirmé en désignant la protection rapprochée comme un objectif prioritaire, contrairement aux anciens textes dont l'objectif était la protection des plaines et des villes éloignées des montagnes.

Dans une thèse relative à l'évolution contemporaine du profil en long des affluents du Rhône moyen, Landon [1999] a proposé un historique de la RTM du bassin versant de la Drôme. Cette étude se compose d'un recensement général des travaux effectués dans le département de la Drôme depuis 1863 sur les périmètres acquis par l'État (d'après l'enquête RTM de 1994 réalisée par l'ONF et la DDAF) ; d'un descriptif détaillé des essences utilisées pour le reboisement ainsi que des techniques mises en œuvre pour la stabilisation des torrents; d'un bilan chronologique des travaux et du taux de boisement. Cette étude met en lumière différents points : (1) l'importance des travaux réalisés (18 500 ha reboisés, plus de 12 000 ouvrages de génie civil torrentiel réalisés) ; (2) la rapidité avec laquelle ces travaux ont été entrepris puisque dès 1928, l'essentiel des travaux initialement prévus dans le bassin de la Drôme est achevé ; (3) l'efficacité du dispositif sur le ralentissement des apports sédimentaires en provenance des affluents, considérée comme effective à partir des années 1930. Quelques chiffres sont également fournis. La progression des surfaces boisées pour l'ensemble du département de la Drôme, tous propriétaires confondus, entre 1878 et 1983 a été de 88 000 ha, dont 18 500 ha situés en périmètre RTM, soit 21 % du gain. Le taux de boisement du bassin est passé de 27,40 % en 1835 à 45,40 % en 1988.

Concernant le haut-bassin du Roubion, une étude récente sur l'évaluation des potentialités de recharge du cours d'eau réalisée pour le compte du Syndicat Mixte d'Aménagement Rural de la Drôme comprend une analyse détaillée des travaux RTM réalisés sur les communes de Bézaudun-sur-Bine et Les Tonils [Liébault *et al.*, 1998]. Une quantification des gains forestiers issus des reboisements RTM montre que ceux-ci ont participé à hauteur de 45 % à l'extension totale des surfaces boisées entre 1826 et 1991 sur la commune des Tonils, tandis que sur Bézaudun-sur-Bine, les travaux de revégétalisation ont été très faibles puisqu'ils n'occupent que quelques hectares. Un bilan est également proposé concernant les travaux récents de reverdissement des marnes effectués dans les années 1980 sous la direction de la DDAF sur les communes de Bézaudun-sur-Bine et de Mornans. L'étude montre que ces travaux ont été efficaces et ont conduit à une nette progression des surfaces végétalisées sur des terrains autrefois en proie à l'érosion.

La mission d'expertise réalisée sur le bassin de l'Eygues pour le compte du Syndicat Mixte d'Aména-

gement Rural de la Drôme et des Syndicats drômois et vauclusiens de l'Eygues propose également une synthèse des travaux RTM réalisés sur l'ensemble des Forêts Domaniales comprises dans le bassin [Landon *et al.*, 1999]. Cette étude recense 1245 ha de reboisement, 1413 ouvrages hydrauliques de stabilisation torrentielle et près de 51 km de lits revégétalisés. Ces chiffres sont également issus de l'enquête RTM de 1994 réalisée par l'ONF et la DDAF.

Toutes ces études récentes permettent de dresser un tableau général des travaux entrepris. Néanmoins, elles ne nous renseignent pas sur la répartition spatiale de ces travaux et elles ne permettent pas d'identifier les contrastes régionaux à l'intérieur des bassins d'étude et donc d'évaluer plus précisément l'influence de la RTM sur l'évolution de l'activité torrentielle. Nous proposons donc ici de ré-examiner le thème de la correction torrentielle à partir des « comptes permanents », registres d'inventaire de la RTM qui nous permettent de présenter une chronologie affinée ainsi qu'une géographie détaillée des travaux.

2.1.1.2. Approches méthodologiques

Les textes législatifs relatifs aux travaux de correction torrentielle ont défini une terminologie territoriale précise concernant les secteurs où l'intervention était jugée prioritaire. Le périmètre de restauration est défini comme l'enveloppe spatiale au sein de laquelle les travaux d'utilité publique peuvent être réalisés. Ce périmètre englobe généralement un nombre important de communes, dans les limites du bassin versant de la rivière torrentielle à traiter. Les bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion ont été divisés en 6 grands périmètres (Basse-Drôme, Haute-Drôme, Roanne, Bez, Eygues, Oule, Roubion). Chaque périmètre regroupe un ensemble de séries domaniales RTM, définie chacune comme l'ensemble des terrains acquis par l'Etat au titre de la RTM sur une commune donnée [Poncet, 1995]. Depuis 1974, les documents-cadres établis par l'Office National des Forêts en vue de la gestion des massifs forestiers (dits « aménagements forestiers ») regroupent les anciennes séries domaniales RTM (constituées de l'ensemble des terrains domaniaux, boisés, boisables ou non), par secteurs géographiques cohérents sous la dénomination de Forêt Domaniale RTM. Dès l'origine, deux grands types de travaux seront exécutés dans les périmètres : les travaux de revégétalisation et les travaux de correction hydraulique. Notre secteur d'étude, qui s'étend principalement sur le département de la Drôme et partiellement sur celui des Hautes-Alpes (hautes vallées de l'Eygues et de l'Oule), comprend 73 séries RTM réparties en 23 Forêts Domaniales (Fig. 65).

Les travaux effectués dans le cadre de la loi RTM ont fait l'objet d'un inventaire annuel détaillé par séries domaniales RTM sur l'ensemble des périmètres du territoire national. Cet inventaire, dénommé « comptes permanents RTM », a été institué par la Loi du 4 avril 1882 et détaillé par l'Instruction Générale du 2 février 1885 (circulaire 345). Il apparaît que les travaux antérieurs à 1882 ont également été recensés et ajoutés aux comptes permanents lors de leur création. Ces registres ont été mis à jour jusqu'en 1978, date à partir de laquelle les travaux, souvent peu nombreux, ont été inventoriés dans les sommiers des forêts domaniales RTM.

Ces registres se composent de trois parties : (1) l'historique des acquisitions de terrain et des dépenses les concernant ; (2) l'historique et les résultats des travaux ; (3) le détail des travaux. Le recensement des travaux réalisés chaque année est contenu dans les deux dernières parties des comptes. La partie concernant l'historique et les résultats des travaux fournit une synthèse des opérations réalisées, tandis que la troisième partie offre un relevé détaillé des travaux effectués pour le compte de l'Etat suivant une nomenclature précise. Cette dernière se décompose en 15 rubriques, qui permettent de différencier clairement les travaux de végétalisation (reboisement, enherbement, plantations ou semis d'arbustes) des travaux de génie civil (construction de barrages, seuils, clayonnages ou fascinages) et d'entretien ou de préparation des chantiers (ouverture de pistes, pose de clôtures, travaux de sylviculture, mise en place de pépinières).

L'exploitation des comptes permanents (rubrique « détail des travaux ») a été conduite sur chacune des séries domaniales incluses pour tout ou partie dans les 51 bassins versants d'étude. Les rubriques qui ont été prises en compte regroupent l'ensemble des travaux de revégétalisation et de génie civil effectués (semis, plantations, enherbement, fascinages et clayonnages, barrages et seuils, façonnage de lit). Ces informations permettent de quantifier précisément l'investissement engagé mais elles ne donnent qu'une idée approximative des surfaces réellement stabilisées. Il s'avère en effet que sur certaines séries RTM, la somme des hectares de terrain plantés est supérieure à la superficie totale de la série. Ceci s'explique par le fait que certains terrains ont fait l'objet de plusieurs plantations successives, appelées regarnis, lorsque les premières opérations de reboisement ont été infructueuses. D'autre part, tous les terrains plantés n'ont pas produit sur le long terme les massifs forestiers escomptés. Il a donc été nécessaire d'utiliser une autre source d'information pour évaluer précisément les surfaces effectivement reboisées au titre de la RTM. Il s'agit de l'enquête RTM de 1964, qui avait pour objectif de définir l'état et les besoins des séries domaniales en vue de la préparation du projet de budget de 1965, mais également du cinquième plan de financement des travaux RTM (1966-1970). Cette enquête propose pour chaque série RTM un tableau avec les superficies des terrains non susceptibles de reboisement, boisés naturellement, reboisés et à reboiser. Ces données ont été collectées pour chacune des séries domaniales contenues dans notre secteur d'étude.

Pour les besoins de l'analyse comparative inter-bassins, il s'est avéré nécessaire d'estimer la somme des travaux RTM réalisés dans chaque bassin versant d'étude. Or, les comptes permanents offrent un décompte par commune, chaque série RTM regroupant l'ensemble des terrains acquis par l'Etat dans une commune donnée. Nous avons donc redistribué les travaux de revégétalisation au prorata de la superficie périmétrée dans chaque bassin versant, en faisant l'hypothèse d'une distribution homogène des travaux sur la série. En ce qui concerne les travaux de génie civil et de façonnage de lit, la redistribution a été parfois facilitée par l'existence d'anciennes cartes de localisation des tronçons corrigés. Ces opérations ont permis d'obtenir pour chaque affluent des densités d'ouvrages au km² ou des pourcentages de terrains reboisés ou enherbés.

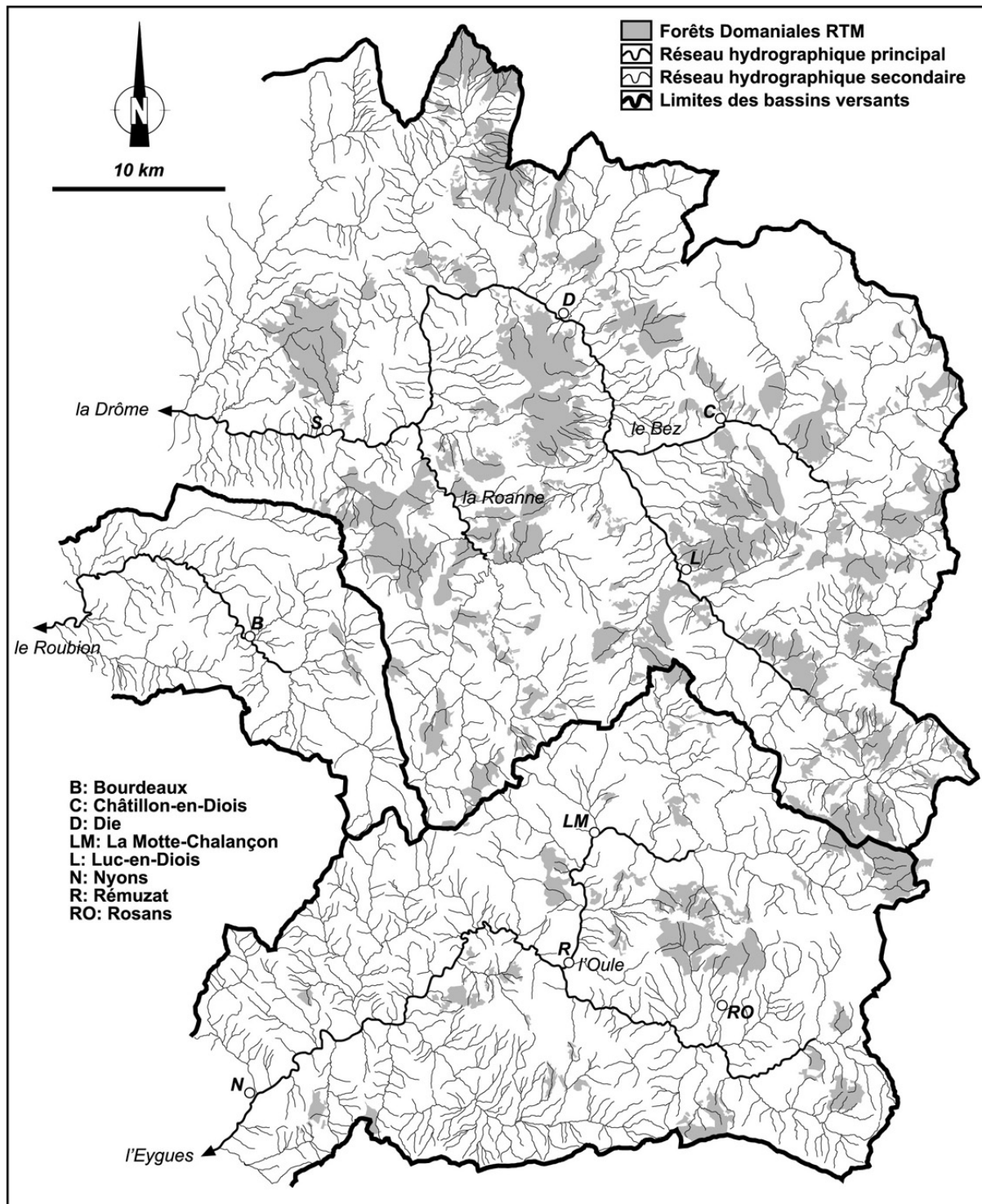


Figure 65
Les forêts domaniales RTM contenues dans les bassins versants d'étude

2.1.1.3. Les différents types de travaux réalisés

TRAVAUX DE REVEGETALISATION

Les travaux de revégétalisation regroupent l'ensemble des techniques qui concourent à l'installation d'un couvert végétal protecteur sur les terrains en proie à l'érosion. On distingue généralement les travaux de reboisement des travaux d'enherbement. Ces deux opérations sont souvent directement associées. L'enherbement consiste à mettre en place une végétation herbacée préalablement ou conjointement aux travaux de semis ou de plantation d'essences forestières afin d'assurer une protection transitoire des jeunes plants sensibles aux agressions du climat et de l'érosion. Il se différencie du gazonnement qui a pour objectif la création d'une végétation herbacée susceptible de fournir au pâturage des ressources périodiques et perpétuelles [Demontzey, 1882]. Même si ces deux opérations se font par semis de graines fourragères, elles répondent à des objectifs différents.

La nomenclature des comptes permanents relative aux travaux visant à la mise en place d'un couvert herbacé ne permet pas de faire la distinction entre l'enherbement et le gazonnement tels qu'ils viennent d'être définis. Nous pouvons cependant penser que l'enherbement a largement prévalu dans les montagnes drômoises car l'étage alpin est quasi inexistant dans ces massifs qui n'offrent donc que de faibles potentialités naturelles pour l'exploitation de grands pâturages d'altitude.

Le reboisement des terrains dénudés a utilisé les deux modes du semis et de la plantation. De façon générale, le semis de graines d'arbres ou d'arbustes a été beaucoup moins utilisé que la plantation, étant donné le caractère très aléatoire de son succès dans des milieux aux conditions écologiques difficiles. Le semis n'a été employé qu'à titre exceptionnel et dans des cas spéciaux bien déterminés. Dans son traité pratique du reboisement des montagnes publié en 1882, Demontzey affirme que « *partout où le climat est sec (...), où le sol est sans abris et ne présente que des conditions médiocres en matière de fertilité, où enfin les expositions sont peu favorables, il convient de donner la préférence à la plantation sur le semis, qui ne devient dès lors qu'une rare exception, vu les conditions généralement très mauvaises où ces deux essences (Pin noir et Pin sylvestre) sont employées de préférence* ». Les principales essences utilisées pour le reboisement dans le Diois et les Baronnies étant le Pin noir et le Pin sylvestre, on peut penser que le mode principal de reboisement utilisé fut la plantation. Il semblerait que le semis fut surtout utilisé pour l'installation d'espèces arbustives (bugranes, cytises) conjointement aux plantations de pins.

L'essentiel du reboisement des montagnes a été effectué à l'aide de plants cultivés dans des pépinières implantées par l'administration au cœur même des secteurs à reboiser, ce qui permettait un meilleur contrôle de la production et améliorerait les conditions de bonne reprise des plants lors de leur mise en terre définitive. Trois à quatre jeunes plants par trou ont été plantés sur les terrains nus afin d'améliorer les chances de survie. Ces travaux furent généralement effectués au printemps ou à l'automne. Comme nous l'avons vu précédemment, les travaux de plantations furent généralement réalisés conjointement à d'autres opérations visant à améliorer les chances de survie des jeunes plants en leur offrant une protection transitoire ou durable. La technique généralement utilisée fut l'enherbe-

ment ; mais dans certaines circonstances, notamment là où les terrains présentaient une forte instabilité pouvant entraver le succès des plantations, on a procédé à la mise en place de haies vivantes au moyen d'essences feuillues, disposées perpendiculairement à la pente sur une série de banquettes préalablement taillées dans le versant. Cette technique porte le nom de plantation en cordons.

TRAVAUX DE CORRECTION HYDRAULIQUE

Préalablement ou conjointement aux travaux de végétalisation, il est apparu nécessaire de stabiliser les versants par le biais de la correction hydraulique des ravins et torrents. Plusieurs techniques furent mises en œuvre pour corriger les têtes de bassin et assurer ainsi une plus grande efficacité aux travaux de reboisement. Les seuils et barrages constituent souvent les pièces maîtresses de la correction hydraulique torrentielle (Fig. 66A). Leur objectif principal est de stabiliser le profil en long du torrent en créant un mur de chute permettant également de diminuer l'énergie de l'écoulement. La distinction entre seuil et barrage tient dans la hauteur libre de l'ouvrage au niveau du déversoir (H), la limite adoptée étant de 2 mètres (lorsque H est supérieur à 2 m, on parle de barrage ; lorsque H est inférieur à 2 mètres, on parle de seuil). Ces ouvrages furent établis en maçonnerie de pierres sèches, technique progressivement abandonnée au profit du béton à partir des années 1950.

Les clayonnages et fascinages, appelés également barrages en bois ou barrages vivants [Demontzey, 1882] sont de petits ouvrages établis en travers du lit des ravins et constitués de pieux en bois enfoncés dans le lit et de branchages de saules ou autres espèces disponibles disposés en tressages ou en fascines (Fig. 66B et 66C). Le principe est de fournir une protection qui se consolide avec le temps du fait de la reprise progressive des branches de saules. Ces techniques complémentaires, plus simples à mettre en œuvre que les ouvrages en maçonnerie, furent utilisées pour corriger les ravins secondaires et compléter ainsi le dispositif de correction sur l'ensemble des branches collectrices.

Le façonnage de lit fut également largement utilisé dans les Préalpes du Sud. Cette dernière technique est définie dans l'ouvrage de Thiéry [1891] sur la restauration des montagnes : « *cette méthode consiste à façonner le lit au moyen de branchages. On couche au fond du lit, parallèlement à l'axe du ravin et la tête en avant, des perches prises dans les taillis voisins et munies de toutes leurs branches. On cherche à former un tout bien homogène en assemblant le mieux possible les pieds d'un rang de perches avec les têtes du rang suivant ; puis on maintient cet assemblage à l'aide de petits clayonnages ou de seuils de 0,5 m de hauteur au maximum et placés à 20 m environ l'un de l'autre. On revêt de cette manière toute la largeur du lit et les pieds des berges* ». Ce revêtement végétal a pour objectif de favoriser le dépôt des matériaux afin de stopper l'approfondissement du lit et de stabiliser les berges. Il est également mentionné que sur certains torrents à forte pente, les branchages sont remplacés par des blocs, de façon à mettre en place un pavage grossier protégeant le lit contre l'affouillement. Cette technique est également connue sous le terme de garnissage [Mougin, 1931]. Ces opérations permettent également à la végétation spontanée ou introduite de se développer dans le fond du lit (Fig. 67).

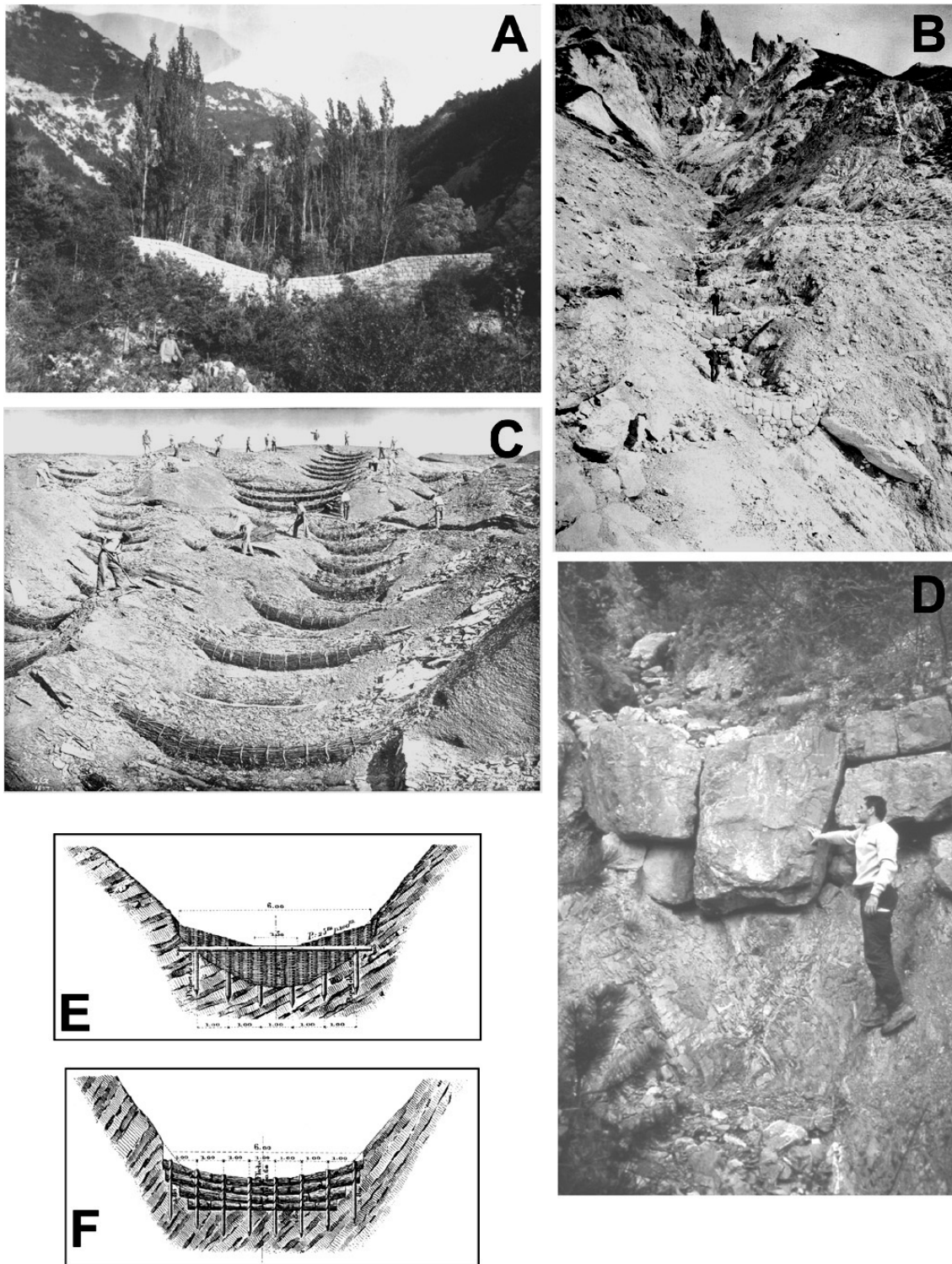


Figure 66

Exemples de correction hydraulique torrentielle ; A : barrage en maçonnerie de pierres sèches, série RTM de Menglon, 1928 (collection RTM-ONF Die) ; B : série de barrages rustiques en pierres sèches, Torrent de Saint-Martin-La-Porte, Savoie [Demontzey, 1894] ; C : fascinages vivants, périmètre du Curusquet, Alpes-de-Haute-Provence [Demontzey, 1894] ; D : barrage en pierres sèches, Ravin de Beaufahyn, Forêt Domaniale de Justin, Diois (cliché FL) ; E : fascinage [d'après Demontzey, 1878] ; F : clayonnages à parement avec longrines [d'après Demontzey, 1882]



Figure 67
Revégétalisation du Ravin de Beaufahyn (série RTM de Die), selon la technique du façonnage de lit, 1904 (collection RTM-ONF Die)

2.1.1.4. Chronologie des travaux

La chronologie des travaux RTM a pu être étudiée à l'aide des comptes permanents. Nous avons répertorié, pour la période 1860-1978, la somme annuelle des travaux réalisés sur les 6 périmètres RTM inclus dans les bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion.

Nous observons que près de 90 % des opérations de restauration ont été réalisées durant la période 1863-1917 (Fig. 68). Nous pouvons cependant dissocier deux phases distinctes :

- La phase 1863-1887 qui correspond à l'amorçage des travaux initiés par les lois de 1860 et 1864. Cette phase se caractérise par l'installation des ouvrages de correction torrentielle (barrages, seuils, fascinages et clayonnages), ainsi que par d'importantes opérations d'enherbement. Il s'agit de l'étape préalable aux travaux de reboisement. L'objectif est de mettre en place des conditions optimales de stabilité permettant d'augmenter les chances de réussite des plantations et semis qui démarreront véritablement dans la décennie 1890.
- La phase 1887-1914, initiée par la loi de 1882, durant laquelle les travaux de reboisement seront réalisés (plantations, semis). Le décalage temporel des travaux de reboisement s'explique également par la nécessité de constituer des groupes de parcelles jointives suffisamment étendues pour permettre l'installation de pépinières et l'ouverture de sentiers [Mougin, 1931]. Le reboisement ne peut donc démarrer qu'une fois les acquisitions bien avancées. Cette étape se caractérise également par d'importants travaux de garnissage des lits torrentiels. On observe également la mise en place de petits ouvrages de correction hydraulique. Ceci concerne principalement les périmètres de l'Eygues et de l'Oule où les travaux de restauration n'ont véritablement démarré qu'à partir de 1903.

La guerre de 1914-18 marque l'arrêt de la RTM. A partir de 1917, seuls quelques travaux de reboisement furent entrepris. On distingue nettement deux phases mineures de travaux : (1) de 1920 à 1925 ; (2) de 1931 à 1939. La réduction de l'effort de reboisement entre 1918 et 1930 par rapport aux périodes précédentes s'explique par l'absence de pépinières immédiatement après la première guerre mondiale, par le manque de personnel forestier et par l'insuffisance des crédits mis à la disposition des services de reboisement [Mougin, 1931].

La chronologie des travaux de correction hydraulique révèle un décalage entre l'installation des ouvrages de stabilisation du lit (seuils, barrages, fascinages et clayonnages), qui prend place entre 1860 et 1884, et la mise en oeuvre des travaux de garnissages, qui démarre en 1890 et se termine en 1914. Ce décalage peut s'expliquer (1) par la nécessité de stabiliser les atterrissements torrentiels générés par la mise en place du dispositif de correction torrentielle, et (2) par le fait que dans un premier temps, on s'efforce de stabiliser les branches torrentielles principales au moyen de gros ouvrages de calage (seuils, barrages), et dans un deuxième temps, des travaux plus légers sont entrepris sur les ravins secondaires (garnissages).

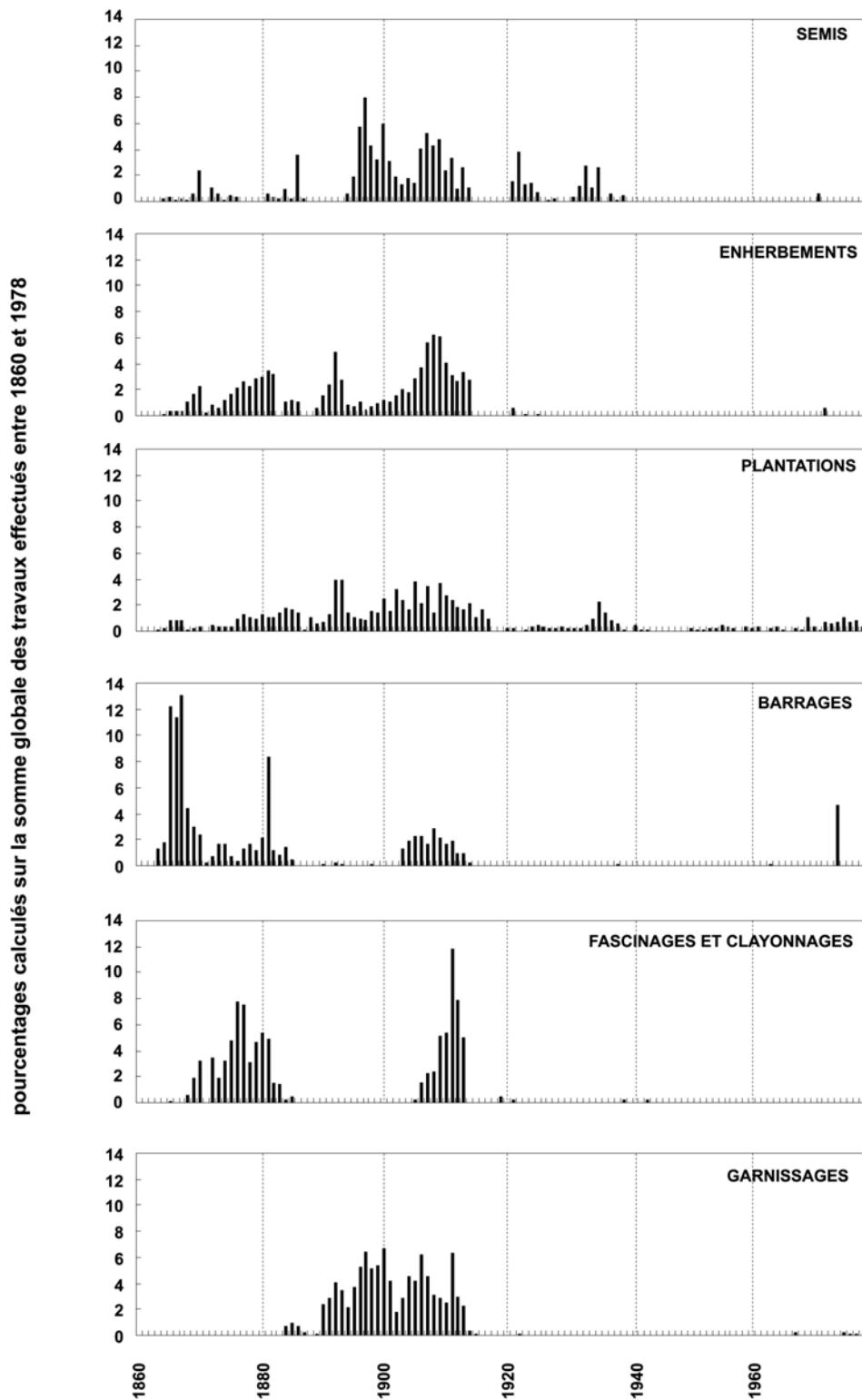


Figure 68

Chronologie des travaux RTM sur la période 1860-1978, étudiée à partir des comptes permanents (périmètres des bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion)

2.1.1.5. Répartition spatiale des travaux

L'objectif de protection contre le risque rapproché, tel que défini dans la loi de 1882, a impliqué une délimitation des périmètres strictement limitée aux zones en érosion active de l'époque. La plupart des terrains acquis au titre de la RTM correspondent ainsi aux bassins de réception torrentiels fortement affectés par les processus de ravinement. Ces terrains sont généralement localisés à l'amont des bassins versants, dans des secteurs qui correspondent aux sources sédimentaires des torrents.

La comparaison des travaux RTM réalisés sur les 3 grands bassins d'étude révèle une très nette concentration des actions sur la Drôme (Fig. 69, Tab. 20). Cette prépondérance se manifeste dans chacune des rubriques étudiées (Tab. 20). La grande majorité des terrains acquis au titre de la RTM se situent dans le bassin de la Drôme. La superficie totale des séries RTM de ce bassin représente près de 80 % du cumul des 3 bassins. En terme de superficie relative des séries RTM par rapport à la superficie globale du bassin, la Drôme se situe également nettement devant l'Eygues et le Roubion. L'Eygues présente une situation intermédiaire, tandis que le Roubion se caractérise par des travaux de très faible ampleur. Seule la commune des Tonils a fait l'objet d'acquisitions et de délimitation d'un périmètre de restauration. Un autre périmètre fut projeté sur la commune de Bézaudun-sur-Bine, mais celui-ci ne vit jamais le jour pour des raisons inconnues. Les travaux pondérés par les superficies drainées révèlent l'importance des différences entre les 3 aires de drainage.

Ces disparités régionales soulignent l'existence de secteurs d'intervention jugés prioritaires dans la politique de lutte contre l'érosion. Ces choix furent-ils dictés par un état de dégradation de la couverture végétale plus avancé ou par une pression foncière moins forte dans le Diois par rapport aux Baronnies ? Si nous comparons les densités humaines du milieu du 19^e siècle entre ces deux massifs, nous constatons des chiffres légèrement supérieurs pour le sud du département (Tab. 21). D'autre part, l'exode rural a également été plus intense dans le Diois. D'après l'étude démographique de Daumas [1999], le dépeuplement calculé en pourcentage des restants entre le maximum de 1831 et le minimum de 1975 fut plus important dans le bassin de la Drôme. Alors que les montagnes baronnardes ont conservé 22,40 % de leur population de 1831, celles du Diois n'en ont conservé que 13,30 %. En ce qui concerne l'état de dégradation des terrains, l'hypothèse selon laquelle le Diois aurait présenté une couverture végétale plus dégradée ne semble pas être confirmée par les chiffres relatifs aux pressions humaines. D'autre part, l'aridité plus marquée du climat dans les Baronnies ne joue pas en faveur de cette hypothèse. Une autre explication des disparités pourrait être la proximité des centres de gestion de l'administration des Eaux et Forêts ayant favorisé le Diois (Die, Valence). Il faut également souligner l'ouverture en 1894 de la liaison ferroviaire entre Valence et Aspres-sur-Buëch par le val de Drôme qui donne un nouvel accès vers la frontière italienne et confère au Diois une nouvelle vocation stratégique, contrairement aux Baronnies dont l'enclavement conduit à mettre cette région à l'écart des grands programmes de reboisement.

Première Partie: Les changements fluviaux contemporains dans leur environnement

Tableau 20

Bilan des travaux RTM réalisés dans les bassins versants de l'Eygues, de la Drôme et du Roubion

	Drôme	Eygues	Roubion
Nombre de séries RTM	53	23	1
Superficie totale des séries RTM (ha)	27 428 (16,72)	6 840 (6,22)	150 (0,25)
Semis (ha)	1 664 (1,01)	275 (0,25)	64 (0,11)
Enherbement (t)	406 (0,25)	41 (0,04)	0 (0)
Plantations (ha)	16 935 (10,33)	2 437 (2,21)	92 (0,15)
Terrains reboisés (ha)	13 217 (8,06)	2 393 (2,17)	137 (0,23)
Barrages vivants (nb)	91 590 (55,85)	1 134 (1,03)	36 (0,06)
Barrages et seuils (nb)	13 544 (8,26)	2 387 (2,17)	0 (0)
Façonnages de lit (km)	599 (0,36)	158 (0,14)	0,2 (0,0003)

Les chiffres entre parenthèses correspondent aux pondérations par rapport à la surface du bassin versant (valeurs en pourcentage lorsque les données brutes sont exprimées en unité de surface ; valeurs unitaires par km² lorsque les données brutes sont exprimées en tonnes, nombre ou km)

Tableau 21

Les densités humaines du Diois et des Baronnies en 1831 [Daumas, 1999]

	DIOIS	BARONNIES
montagnes	17,50	23,00
vallées	33,70	44,70

Chiffres en habitants par km² du recensement de 1831

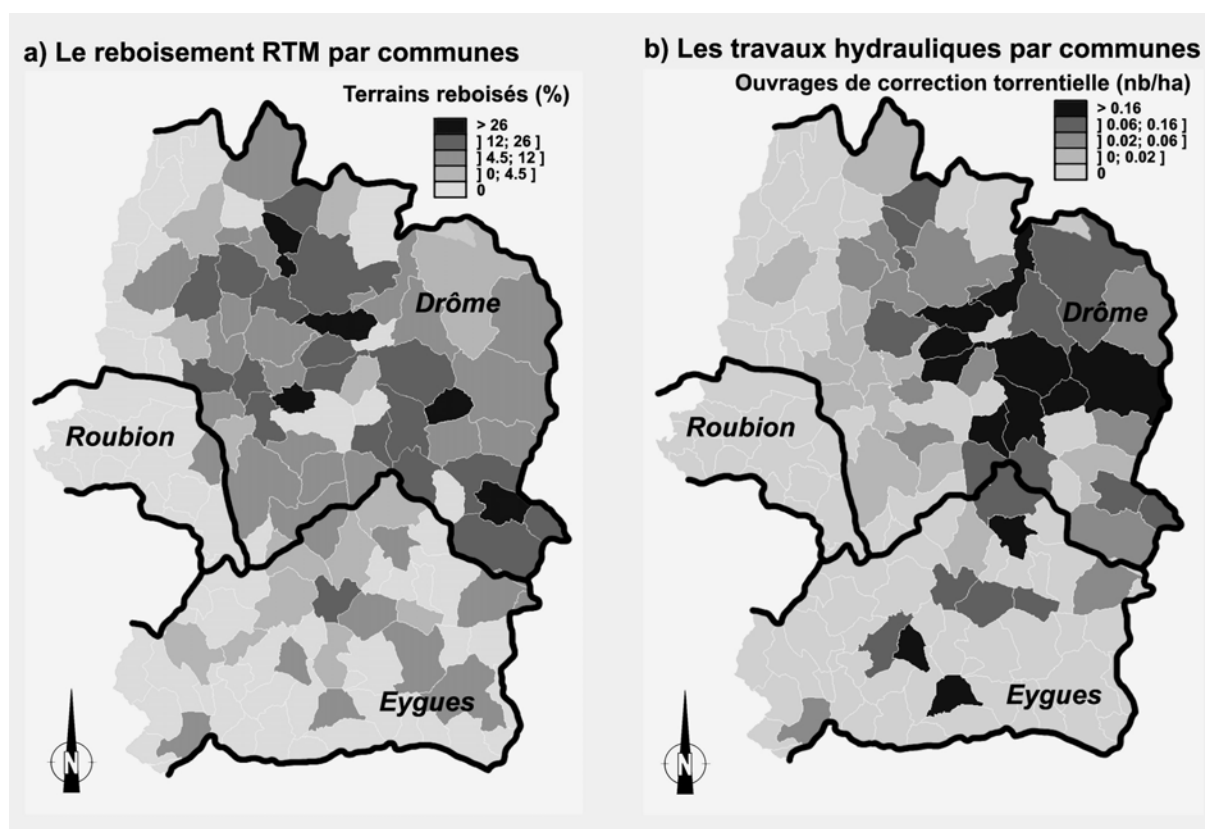


Figure 69

Répartition communale des travaux RTM réalisés entre 1860 et 1978 ; A : travaux de reboisement ; B : travaux de correction hydraulique

2.1.1.6. *Travaux RTM et extinction torrentielle*

Compte tenu de la répartition géographique des travaux RTM, caractérisée par un contraste très net entre les trois grands bassins d'étude, nous devrions observer des différences importantes d'évolution des bandes actives dans l'hypothèse d'une influence de ces travaux sur la morphologie des affluents. Or, aucune différence statistiquement significative du taux de rétraction n'est observée sur la période 1948-1991(96) entre la Drôme, l'Eygues et le Roubion. Il faut donc considérer que la colonisation végétale accélérée des bandes actives mesurée à partir des années 1950 se produit indépendamment de la correction torrentielle. Un grand nombre d'affluents se sont fortement rétractés sans qu'aucune intervention RTM n'ait jamais eu lieu dans leur bassin versant. Ceci est le cas du Rieu Sec, de la Sauve, du Roubion amont, du Cougoir, de la Bine et de l'Eyzarette.

L'éventuel impact morphologique de la correction torrentielle a vraisemblablement été très rapide étant donné la nature même de certaines interventions (garnissages, mise en place de seuils et barrages) et la rapidité de réponse généralement observée sur les cours d'eau de montagne. Ces travaux ayant été réalisés essentiellement entre 1860 et 1914, il est fort probable que les effets induits se soient manifestés dans la première moitié du 20^e siècle et que les changements observés après 1950 soient dues à d'autres causes. Si nous considérons une vitesse de propagation vers l'aval de l'incision située entre 300 et 500 m an⁻¹, conformément aux résultats obtenus à partir des relevés dendrochronologiques précédemment présentés, nous devons considérer que l'effet du tarissement sédimentaire induit par la rétention des matériaux derrière les ouvrages s'est propagé très rapidement vers l'aval.

Les bandes actives observées sur les photographies aériennes de 1948 montrent des affluents plus larges sur l'Eygues par rapport aux deux autres bassins. Ceci pourrait s'expliquer par l'inégale intensité des travaux RTM. Les affluents de la Drôme présenteraient donc en 1948 une rétraction plus avancée du fait de l'ajustement faisant suite aux travaux de correction torrentielle. Il faut cependant évoquer également le caractère plus méditerranéen du bassin de l'Eygues, qui peut expliquer un état de dégradation plus marqué de la couverture végétale et des entrées sédimentaires plus conséquentes. D'autre part, le bassin de l'Eygues présente une lithologie plus marneuse qui peut également expliquer une plus forte instabilité naturelle des versants. Le cas du Roubion, caractérisé par des affluents étroits bien que les travaux RTM aient été très faibles, s'explique principalement par un potentiel de recharge sédimentaire plus faible compte tenu des caractéristiques topographiques du bassin.

L'exploitation des anciens documents cartographiques et topographiques des Ponts et Chaussées suggère l'existence d'une phase d'incision au début du 20^e siècle sur 3 affluents. Il est possible de relier chronologiquement cette phase d'enfoncement avec les travaux de stabilisation des têtes de bassin sur la Barnavette et l'Esconavette où les travaux démarrent en 1868. En revanche, sur la Comane et la Meyrosse, l'incision se produit avant la mise en œuvre des travaux, qui ne démarrent qu'en 1893. On observe également sur l'Archiane la présence d'un niveau de terrasse occupé par

des pins sylvestres dont l'âge moyen est de 73 ans. La Barnavette, l'Esconavette et l'Archiane ont fait l'objet d'importants travaux de correction hydraulique qui ont probablement entraîné une diminution rapide des apports sédimentaires. La diminution de la pente des têtes de bassin consécutive à l'installation des ouvrages de calage du fond a contribué à la mise en place d'aires de stockage artificielles de la charge grossière dans les bassins de réception, entraînant ainsi une probable phase d'érosion progressive. Cette phase d'incision pourrait correspondre à celle observée en Toscane au début du siècle, dans le bassin de la rivière Arno [Rinaldi *et al.*, 1997]. Cet auteur l'attribue chronologiquement aux travaux de correction torrentielle, présents également dans ce secteur. Piégay et Salvador [1997] observent sur les terrasses de la rivière Ubaye l'installation de pins sylvestres dans les années 1920. Ces boisements sont mis en relation avec le tarissement des sources sédimentaires consécutif aux travaux RTM.

2.1.2. *Les changements de l'occupation du sol et le tarissement des sources sédimentaires*

Parmi les causes généralement évoquées pour expliquer l'extinction contemporaine des torrents, une part souvent appréciable est attribuée aux changements ayant affecté l'occupation du sol depuis le début du 19^e siècle. La progression des forêts et des formations végétales arbustives est souvent considérée comme un facteur efficace de ralentissement des apports solides aux cours d'eau [Garcia-Ruiz *et al.*, 1995; Mathys *et al.*, 2003]. Des études et synthèses récentes ont également mis en relation l'incision des lits fluviaux avec la reconquête forestière sur les versants, qui entraîne une réduction des apports solides et éventuellement des pics de crue [Germanoski et Harvey, 1993; Buttle, 1995; Garcia-Ruiz *et al.*, 1997; Piégay et Salvador, 1997; Bravard, 2002; Lach et Wyzga, 2002; Surian et Rinaldi, 2003].

L'influence des changements récents de l'occupation du sol sur l'activité des rivières torrentielles drômoises doit faire l'objet d'une évaluation précise. Ce secteur d'étude se caractérise par l'existence simultanée d'une phase de progression des formations boisées sur les versants et d'un phénomène de rétraction des bandes actives. De nombreuses études ont mis en relation les deux phénomènes [Liébault et Piégay, 2001; Kondolf *et al.*, 2002; Liébault et Piégay, 2002; Piégay *et al.*, sous presse]. Nous proposons ici une synthèse des analyses précédentes ainsi qu'une interprétation fondée sur de nouvelles informations.

2.1.2.1. *Etat de la question*

Comme l'ensemble des zones de montagnes de l'Europe de l'ouest, les Préalpes du Sud ont connu une franche progression des surfaces boisées depuis le milieu du 19^e siècle. Cette progression est liée d'une part aux reboisements effectués dans le cadre de la politique RTM, et d'autre part à la colonisation végétale spontanée des terrains agricoles abandonnés suite à la déprise rurale qui s'amorce à partir de 1850. L'analyse de l'évolution démographique récente du bassin versant de la

Drôme [Landon, 1999] a effectivement montré une très nette diminution de la population entre 1831 et 1990. La densité humaine est passée de 34 à 19 hab. km⁻² entre 1831 et 1954, date du minimum démographique. Cette déprise rurale, plus marquée dans les hauts bassins, est présentée comme un facteur explicatif de la progression des surfaces boisées. L'auteur estime que les effets de la déprise rurale ont du se faire ressentir essentiellement après 1931, date à partir de laquelle les crédits alloués aux travaux de reboisement enregistrent une très forte diminution. Néanmoins, la part relative des boisements spontanés et planifiés sur la progression du couvert forestier n'est pas évaluée.

Une analyse historique détaillée de l'évolution de l'occupation du sol a été réalisée sur deux communes du bassin du Roubion : Bézaudun-sur-Bine et les Tonils [Taillefumier et Piégay, 2003]. Cette analyse, fondée sur la comparaison du cadastre napoléonien (1828) et des photographies aériennes de 1991, montre une nette diminution des terres labourables au profit des forêts et secondairement des landes. Étant donné l'absence de travaux RTM sur la commune de Bézaudun-sur-Bine, la totalité des gains forestiers, qui représentent 16 % de la superficie communale, sont attribués aux effets de la déprise rurale. En revanche, les reboisements planifiés représentent 45 % de la progression forestière sur la commune des Tonils, qui elle-même représente 28 % de la superficie communale. La rétraction des bandes actives de la Bine et du Soubriou, les deux ruisseaux qui drainent ces communes, est mise en relation avec ces changements d'occupation du sol [Liébault et Piégay, 2001].

Ces différents travaux montrent l'existence simultanée d'une reconquête forestière sur les versants et d'une métamorphose fluviale qui exprime bien une modification du bilan sédimentaire sous l'effet d'une diminution des apports en matériaux depuis les versants. Notre objectif est de vérifier cette relation de cause à effet au travers (1) d'une approche régionale fondée sur 51 bassins versants et (2) d'une approche plus détaillée conduite sur 6 bassins versants aux niveaux desquels nous avons étudié l'emprise spatiale des sources sédimentaires à l'échelle des 50 dernières années.

2.1.2.2. Approches méthodologiques

HISTORIQUE DES CHANGEMENTS DE L'OCCUPATION DES SOLS

L'étude historique de l'évolution de l'occupation du sol a été conduite en étroite collaboration avec Fabrice Taillefumier (Université Lumière Lyon 2) qui réalise actuellement une thèse sur l'évolution contemporaine du géosystème des Préalpes sèches de la Drôme. L'approche méthodologique retenue ici s'inspire en grande partie de ses travaux [Taillefumier, en préparation]. Elle est fondée essentiellement sur l'exploitation des archives. Nous avons retenu plusieurs dates afin de mettre en évidence les tendances d'évolution de l'occupation du sol sur un ensemble de 123 communes qui inclut l'ensemble des 51 bassins versants étudiés : la première moitié du 19^e siècle (cadastre napoléonien) ; 1929 et 1954 (enquête agricole de 1954) ; 1988-1991-1993 (Corine Land Cover de 1993; Recensement Général Agricole de 1988, Inventaire Forestier National de 1991).

Le cadastre napoléonien constitue le plus ancien des cadastres modernes (sur plans et registres) disponible dans notre secteur d'étude. Il offre une quantification précise de l'affectation des terrains

sur la période 1822-1840 pour l'ensemble des communes retenues. Nous avons exploité les renseignements contenus dans les matrices des propriétés foncières qui fournissent les surfaces occupées par les différents types de terrains sur l'ensemble de la superficie cadastrée de la commune. La surface cadastrée correspond à la totalité des terrains imposables. Elle ne prend pas en compte les chemins, rivières, églises, maisons non imposables, chapelles et cimetières. Ces documents ont été consultés aux Archives Départementales de la Drôme (Valence) et des Hautes-Alpes (Gap).

L'utilisation du cadastre napoléonien, comme toute approche fondée sur des documents anciens, nécessite la mise en place d'une méthode de restitution cohérente des informations étant donné l'existence d'une terminologie propre [Eynart-Machet, 1993]. Nous avons regroupé les différents types de terrains pris en compte par le cadastre en 6 classes d'occupation du sol. Le choix de ces classes a été dicté à la fois par la nécessité d'acquérir une information synthétique et adaptée à notre problématique et par la nécessité d'établir une base de données homogène sur la période d'étude. Ces exigences méthodologiques nous ont donc conduit à réaliser des regroupements de « natures de cultures » (terme de l'époque désignant le type d'occupation du sol). Les 6 classes d'occupation du sol retenues ainsi que les regroupements effectués sont les suivants :

- Forêts (bois taillis, bois futaie, châtaigneraies) ;
- Landes (landes) ;
- Terres labourables (labours, chènevières) ;
- Surfaces toujours en herbe (terres prés, pâtures, prés) ;
- Vergers (vignes, terrains plantés, oliveraies) ;
- Divers (eau et bâti imposable, terres vaines, rochers, jardins, oseraies, saussaies, aunaies).

Les enquêtes agricoles de 1929 et 1954, prises en charge par l'administration de l'Agriculture, nous permettent de reconstituer l'utilisation du sol dans la première moitié du 20^e siècle. Ces enquêtes ont été réalisées sur l'ensemble du territoire national à l'échelle des communes. Les statistiques ont été consultées dans les DDAF de Valence et de Gap. Nous disposons ainsi d'un inventaire précis des surfaces occupées par les différents types d'occupation du sol au niveau des surfaces cadastrées des communes. La nomenclature détaillée a fait l'objet d'un regroupement en 6 classes d'occupation du sol, conformes à celles retenues dans l'analyse du cadastre napoléonien.

Corine Land Cover est une base de données géographiques de l'occupation des terres réalisée en France par l'IFEN (Institut Français de l'Environnement) dans le cadre du programme européen CORINE (Coordination de l'Information sur l'Environnement) mené par l'Agence Européenne pour l'Environnement. Les principales caractéristiques de cette base de données sont les suivantes : (1) l'occupation du sol est définie par une nomenclature standard hiérarchisée en 44 postes qui permet les comparaisons internationales, régionales, départementales et communales ; (2) l'échelle du rendu cartographique est le 1/100 000e et la surface de la plus petite unité cartographiée est de 25 ha ; (3) les données de base sont les images satellites SPOT en mode multi-spectral, les images satellite

Landsat (TM) et les données issues des cartes topographiques et photographies aériennes qui permettent d'affiner l'interprétation de certains postes de la nomenclature.

Les images satellites utilisées pour réaliser la cartographie dans notre secteur d'étude sont celles de 1993. Les regroupements effectués pour l'obtention de nos 6 classes d'occupation du sol sont présentés en détail dans un rapport d'expertise [Liébault *et al.*, 2001]. Afin d'obtenir une information par commune, nous avons effectué un croisement entre la cartographie de l'occupation du sol issue du regroupement et la carte des communes. Cette opération a été réalisée à l'aide du SIG MapInfo.

Cette base de données a été retenue car elle présente l'avantage d'offrir une information homogène sur l'ensemble de notre secteur d'étude, contrairement à d'autres sources d'information disponibles. Les données de l'Inventaire Forestier National (IFN) de 1991 offrent en effet une cartographie détaillée des différents types de formations végétales à l'échelle du département mais regroupent sous l'appellation « hors thème » l'ensemble des terrains agricoles et improductifs du point de vue de la végétation. Cette base de données est donc incomplète et ne répond pas entièrement à notre problématique. Il existe également une base de données récente relative aux terrains agricoles : le Recensement Général Agricole (RGA) de 1988. Bien que très précise en ce qui concerne les surfaces occupées par les différents types de culture, cette statistique est également incomplète puisqu'elle ne prend pas en compte les surfaces non agricoles. Nous avons néanmoins utilisé ces bases de données afin de confirmer les tendances obtenues à partir de Corine Land Cover. Cette démarche de validation s'impose par le fait que la résolution des images et les confusions de petites surfaces (prairies, cultures) rendent les interprétations de Corine Land Cover délicates.

Le principal objectif de *'Inventaire Forestier National'* est de fournir des données fiables en vue de la mise en place d'une politique adaptée de gestion de la ressource forestière. Son rôle essentiel est de procéder à une estimation des surfaces occupées par les différents types de formations végétales définies par une nomenclature détaillée inspirée des inventaires étrangers, des statistiques internationales et des coutumes forestières françaises. Cet organisme réalise pour chaque département une cartographie des formations végétales au 1/25000ème selon une périodicité de 10 ans. La méthode adoptée repose sur une étude préalable dont l'objectif est le recueil de données externes et la mise au point des nomenclatures et protocoles, suivie d'une cartographie qui s'appuie sur l'interprétation des photographies aériennes infra-rouges réalisées spécifiquement pour les besoins de l'inventaire. Les unités cartographiques font également l'objet d'une vérification à partir de sondages de terrain.

L'IFN définit le type de formation végétale comme une classe de la couverture du sol qui peut être un type de peuplement forestier, un type de lande ou un type pastoral. Elle regroupe sous l'appellation « hors thème » tous les terrains qui ne sont pas concernés par ces divers types de formations (terrains agricoles autre que pâturages et pacages, terrains improductifs et eau). La distinction entre les différents types de peuplements forestiers définis dans la nomenclature se fait suivant une unité spatiale élémentaire de 10 à 20 ha. Cette taille minimale étant réduite à 2,25 ha pour certains types de peup-

plements. Dans les types de peuplements forestiers dénommés « boisements lâches », l'existence de parties non boisées est un élément de la définition. Ces parties peuvent représenter jusqu'à 90 % des terrains concernés mais n'en constituent le plus souvent que 40 à 60 % [IFN, 1997].

Cette base de données offre une description détaillée des formations végétales forestières selon des définitions propres. Elle permet d'évaluer avec précision les surfaces actuelles des peuplements forestiers mais peut poser problème dans le cadre d'une analyse diachronique avec d'autres sources d'informations. La définition des boisements lâches conduit nécessairement à une surestimation des forêts par le simple fait qu'elle englobe une part importante de terrains non boisés. Notre problématique nécessiterait de distinguer ces terrains selon une résolution plus fine que celle adoptée par l'IFN.

Nous avons effectué un certain nombre de regroupements au sein de la nomenclature détaillée afin d'obtenir une information synthétique et compatible avec les autres sources d'information [Liébault *et al.*, 2001]. La cartographie issue de ce regroupement a ensuite été croisée avec la carte des communes à l'aide du logiciel MapInfo.

Le recensement général agricole de 1988 est une enquête réalisée auprès de l'ensemble des exploitations agricoles françaises (la quatrième en France depuis la seconde guerre mondiale) et dirigée conjointement par le SCEES (Service Central des Enquêtes et Études Statistiques) du Ministère de l'Agriculture et de la Forêt et l'INSEE (Institut National de la Statistique et des Études Économiques). La collecte de l'information ainsi que le contrôle et la saisie des questionnaires ont été assurés par les services statistiques des DDAF. L'objectif a été de dresser l'état de l'agriculture selon un protocole détaillé permettant de caractériser l'utilisation du sol, le cheptel, ainsi que le matériel et la population agricole. Le principal inconvénient de cette enquête, dans l'optique d'une analyse spatiale à l'échelle des communes, est que la statistique est fondée sur les exploitations agricoles. Nous avons cependant la chance de disposer, dans le département de la Drôme, d'une enquête complémentaire dont l'objectif fut de détailler pour chaque exploitation les surfaces exploitées dans les différentes communes. Cette information n'est pas disponible dans le département des Hautes-Alpes. Le RGA nous permet d'évaluer avec précision l'étendue des terres labourables, des vergers et des prairies artificielles. Nous l'avons donc utilisé comme source d'information complémentaire afin de vérifier les tendances observées à partir de l'utilisation de Corine Land Cover. Cette vérification a été possible concernant les terres labourables et les vergers, tandis que pour les surfaces en herbes, le RGA étant incomplet (les pâturages communaux ainsi que les formations pastorales naturelles ne sont pas pris en compte), nous n'avons pas pu établir de comparaison.

EVOLUTION DES SOURCES SEDIMENTAIRES

L'analyse diachronique de l'occupation du sol à partir de différents documents ne permet pas de détecter avec précision l'évolution des surfaces occupées par les sources sédimentaires. La comparaison des taux de boisement à différentes dates ne donne aucune information sur la nature des terrains reboisés. Seule une cartographie multi-date des zones en érosion active permet de déterminer

l'évolution en surface des sources sédimentaires et ses implications en terme d'apports solides. Ce type de démarche implique un changement d'échelle de travail, compte tenu de la complexité de la tâche. Nous avons effectué cette cartographie sur les 3 couples de bassins versants préalablement sélectionnés pour l'analyse de détail des bandes actives (Fig. 36).

Les surfaces en érosion active ont été mesurées sur les photographies aériennes de 1948 et 1991-96. Nous avons procédé par traitement d'image, à partir du logiciel *Photoshop*. Les bassins versants ont été préalablement délimités sur les photographies aériennes, de façon à identifier et mesurer les surfaces de travail en nombre de pixels (les photographies ont été scannées selon une résolution de 900 dpi). Les zones en érosion active ont ensuite été individualisées à l'aide d'outils de sélection qui permettent de regrouper l'ensemble des pixels d'une couleur donnée (les zones en érosion apparaissent en teintes claires sur les photos) (Fig. 70). Cette étape implique un masquage préalable de tous les pixels qui pourraient être confondus avec les zones en érosion (routes et chemins, certains champs, bâtiments et zones anthropisées, affleurements rocheux stables). Cette opération nécessite l'usage de la stéréoscopie qui facilite la photo-interprétation. Le nombre de pixels en érosion est ensuite divisé par le nombre total de pixels du bassin versant de façon à calculer la surface relative des sources sédimentaires. Les surfaces ainsi obtenues sont fausses compte tenu de la distorsion des photographies aériennes. Néanmoins, les surfaces relatives sont peu différentes de la réalité si on admet que l'effet de distorsion est sensiblement le même pour la surface du bassin et la surface des sources sédimentaires.

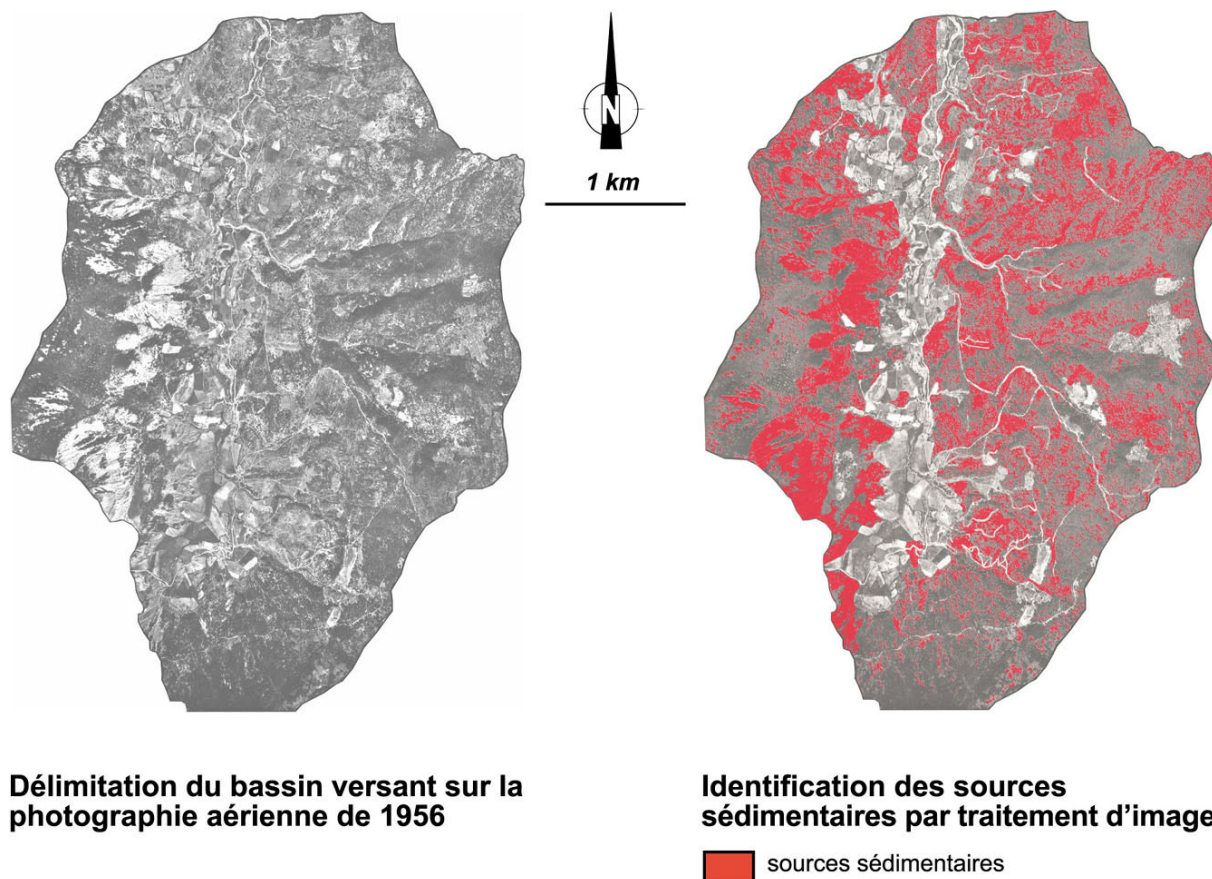


Figure 70

Exemple de cartographie des sources sédimentaires par traitement d'image : la Bordette en 1956

2.1.2.3. Tendances générales d'évolution et disparités régionales

La comparaison séculaire de l'occupation du sol montre une très nette progression des surfaces boisées au détriment des surfaces agricoles (Fig. 71, Tab. 22). Les forêts occupaient en moyenne 30 % du territoire des 123 communes étudiées dans les années 1830. Elles occupent aujourd'hui entre 60 et 70% de ce même territoire. La superficie totale de colonisation forestière entre 1830 et aujourd'hui est de 71 690 ha, ce qui représente 29 % du territoire d'étude. Sur cette même portion d'espace, la totalité des terrains reboisés au titre de la RTM présente une superficie de 13 550 ha. Ce chiffre est issu de l'enquête RTM de 1964, date à partir de laquelle plus de 90 % des travaux de revégétalisation ont été effectués. Nous pouvons donc estimer que la reconquête forestière spontanée représente une surface de 58 000 ha, soit près de 80 % de la totalité des secteurs regagnés par la forêt. Ce chiffre global masque cependant de fortes disparités locales. Sur certaines communes, les gains issus directement des travaux de reboisement peuvent représenter plus de 60 % des terrains colonisés par les forêts (Les Prés, Pennes-le-Sec). Si nous prenons en compte uniquement les communes ayant fait l'objet de travaux de reboisement, soit 59 communes au total, les gains issus de la RTM représentent en moyenne 29 % des gains totaux. Ces chiffres montrent l'importance de la déprise agricole dans l'évolution contemporaine des surfaces boisées.

Tableau 22

L'occupation du sol des 123 communes du Diois et des Baronnies étudiées sur la période 1820-1990 ; les valeurs entre parenthèses sont celles obtenues à partir des bases de données complémentaires (Inventaire Forestier National de 1991 pour les forêts et landes, Recensement Général Agricole de 1988 pour les terres labourables et vergers) ; les pourcentages sont calculés sur la base des surfaces cumulées de chaque commune

	1820-1844	1929	1954	1992
Forêts (%)	30	37	41	59 (69)
Landes (%)	18	35	44	15 (7)
Terres labourables (%)	30	9	6	17 (5)
Surfaces toujours en herbes (%)	16	10	7	6
vergers (%)	2	2	2	1 (2)

1820-1844 : cadastre napoléonien

1929 : enquête agricole

1954 : enquête agricole

1992 : Corine Land Cover

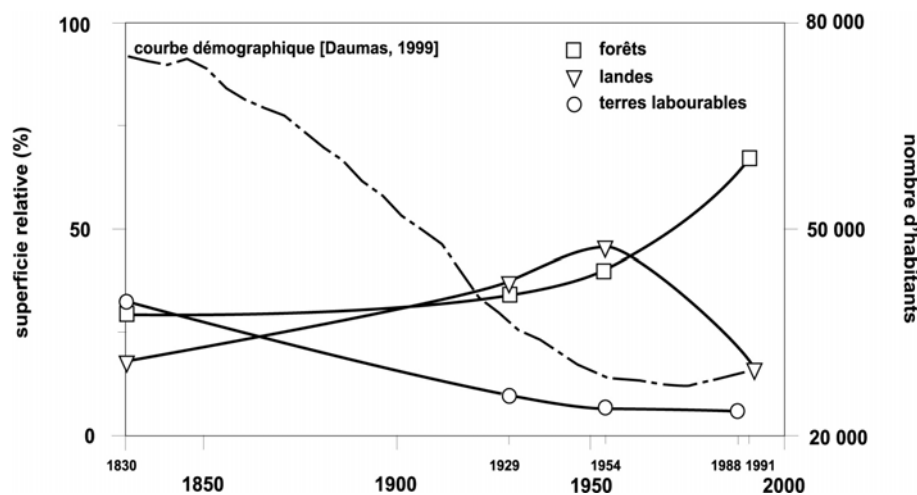


Figure 71

Courbe d'évolution de l'occupation du sol et de la population sur la période 1820-1990 pour l'ensemble des 123 communes étudiées

Si nous comparons les évolutions des surfaces boisées obtenues à partir des différentes sources d'information, nous obtenons des tendances similaires, bien que l'utilisation des données de l'IFN montre une reconquête forestière plus forte (Tab. 22). Ceci est à mettre en relation avec l'intégration des boisements lâches dans les superficies forestières.

Les surfaces en landes ont fortement progressé entre le début du 19^e siècle et 1954, alors qu'elles ont fortement diminué durant la seconde moitié du 20^e siècle d'après les estimations de Corine Land Cover. L'analyse des chiffres de l'IFN conduit à des résultats similaires, bien que cet organisme donne une définition plus restrictive des landes. Ces tendances suggèrent l'existence de deux phases distinctes : (1) une première phase de colonisation arbustive importante qui perdure jusqu'au milieu du 20^e siècle, sous l'effet de l'abandon des terrains agricoles ; cette évolution a du s'amorcer dans les années 1850 si on considère les courbes démographiques ; (2) une deuxième phase de régression des landes dans la seconde moitié du 20^e siècle, difficile à interpréter. Le terme de lande

peut parfois désigner une réalité bien différente. Taillefumier et Piégay [2003] ont démontré que la lande de 1850-1950 est une formation arbustive ouverte, qui correspond souvent à des pâturages plus ou moins dégradés, tandis que la lande actuelle constitue une formation végétale à dominante d'arbustes, qui peut être interprétée comme un stade successional qui précède celui de la forêt.

Les surfaces agricoles enregistrent une diminution très nette entre le début du 19^e siècle et 1954. Les terres labourables, qui occupaient 30 % du territoire dans les années 1830, ne représentaient plus que 6 % de cette même surface en 1954. Ces chiffres montrent que la déprise agricole est un phénomène séculaire dont l'origine est antérieure aux années 1950. L'évolution obtenue pour la période 1954-1992 à partir de Corine Land Cover montre une augmentation des terres labourables dont la superficie relative passe de 6 à 17 %. Lorsque nous étudions cette évolution à partir des données du recensement général agricole de 1988, nous observons une stabilité de ces surfaces dans la seconde moitié du 20^e siècle, tendance plus proche de la réalité. Les informations du recensement général agricole de 1988 sont certainement mieux adaptées à l'analyse diachronique puisqu'elles correspondent à une même logique de comptabilisation par rapport à celles publiées en 1954. Il faut donc fortement nuancer les résultats obtenus à partir de Corine Land Cover qui surestime ces surfaces du fait d'une généralisation trop simplificatrice. Ceci est certainement lié à la définition du poste intitulé « *territoires principalement occupés par l'agriculture avec présence de végétation naturelle* ». Ce poste permet de simplifier les structures paysagères complexes imbriquant les terres agricoles et les friches et conduit à une surestimation des labours au détriment des formations arbustives. Ceci permettrait également d'expliquer partiellement l'ampleur de la diminution des landes mesurée sur cette même période. Les surfaces en herbes montrent une diminution importante sur l'ensemble de la période, avec une contraction forte entre la fin du 19^e siècle et 1954. Les vergers présentent des surfaces faibles et des évolutions peu marquées.

La reconquête forestière comparée des bassins de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion a été étudiée à partir de l'évolution des taux de boisement par commune depuis 1830 (Fig. 72). Les tendances sont globalement similaires, bien que le reboisement de la Drôme ait démarré plus tôt. Ceci est à mettre en relation avec les travaux de reboisement qui ont été plus importants dans ce bassin. Ceci est confirmé par la cartographie de la reconquête forestière sur la période 1830-1954 (Fig. 73A), qui montre des taux de colonisation généralement plus élevés sur les communes de la Drôme, notamment dans les principaux secteurs d'intervention de la RTM (Fig. 69A).

L'évolution des surfaces boisées entre 1954 et 1991 montre une plus grande homogénéité régionale (Fig. 73B). La reconquête forestière est particulièrement prononcée dans les bassins de la Drôme et de l'Eygues. Les taux de boisement des communes regroupées par bassin ont été comparés à partir d'une ANOVA complétée par un test de Scheffé. Les résultats ne montrent pas de différence significative d'évolution entre la Drôme et l'Eygues (les moyennes sont respectivement de 33,67 et 27,23 %, avec une probabilité p de 0,087), tandis que le Roubion se caractérise par un reboisement significativement moins marqué. La moyenne est ici de 16,33 %, avec une probabilité p de 0,0004

(comparaison avec la Drôme) et de 0,0379 (comparaison avec l'Eygues). Les communes qui se sont le plus reboisées sont généralement situées dans les secteurs les plus cloisonnés et les plus éloignés des principales agglomérations urbaines que sont Die, Nyons et Crest (vallée de la Roanne, haut bassin de la Drôme, vallée de l'Oule). Ceci illustre bien le fait que la progression des forêts postérieure à 1950 est le résultat de la déprise rurale qui s'est développée principalement dans les secteurs les plus marginalisés par rapport aux nouvelles exigences de rentabilité économique qui s'affirment de plus en plus après la seconde guerre mondiale.

Ces différentes analyses mettent en évidence une reconquête forestière généralisée à partir des années 1950, dont les disparités régionales sont nettement moins prononcées que celles qui caractérisent l'intervention RTM. Hormis les communes situées à proximité des principaux centres d'activité économique, les effets de la déprise rurale se sont exercés de façon sensiblement identique sur l'ensemble du secteur d'étude.

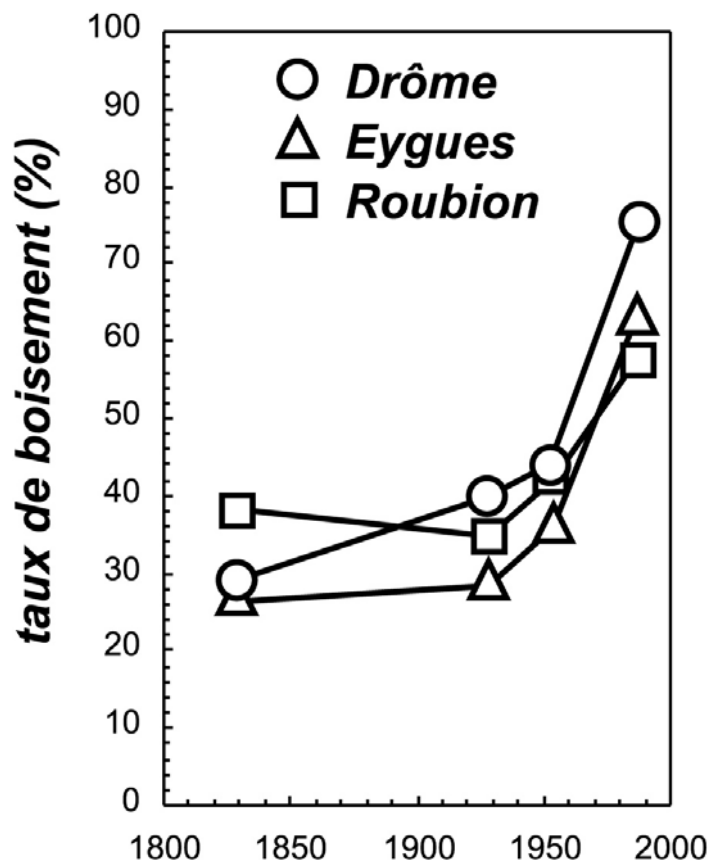
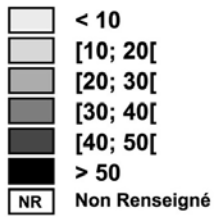


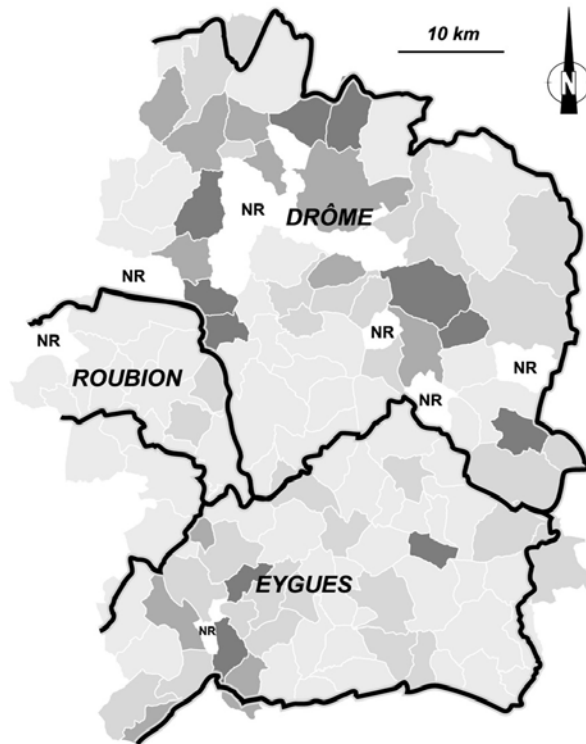
Figure 72
Évolution comparée du taux de boisement des bassins versants de la Drôme, de l'Eygues et du Roubion

A

Reconquête forestière
entre 1830 et 1954 (en %
du territoire communal):

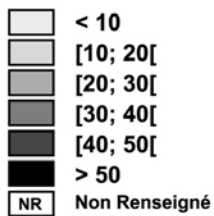


 Limite de bassin versant



B

Reconquête forestière
entre 1954 et 1991 (en %
du territoire communal):



 Limite de bassin versant

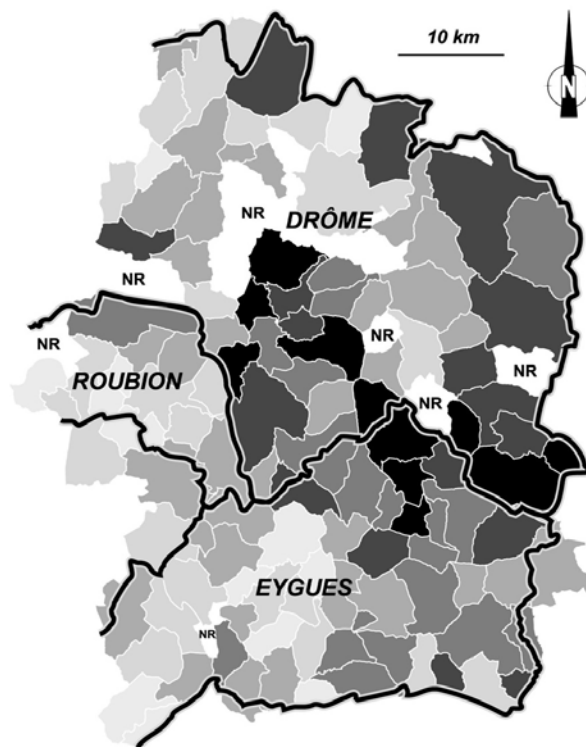


Figure 73

Cartographies communales de la reconquête forestière : (A) entre 1830 et 1954 ; (B) entre 1954 et 1991
(sources : cadastre napoléonien, enquête agricole de 1954, Inventaire Forestier National de 1991)

2.1.2.4. *La reconquête forestière et la stabilisation des sources sédimentaires*

L'analyse diachronique des surfaces occupées par les sources sédimentaires dans 6 bassins versants témoins met en évidence une nette diminution des zones en érosion active de versant sur la période post-1950 (Fig. 74 ; Tab. 23). Les anciennes sources aujourd'hui stabilisées par végétalisation peuvent représenter jusqu'à 16 % du bassin versant, comme sur le Rieu de Montaulieu. Les taux de stabilisation, calculés en faisant le rapport entre les sources colonisées et les sources actives initiales, s'échelonnent entre 8,50 % (Soubrion) et 59 % (Bordette). Les taux maximaux de rétraction mesurés après 1950 présentent une certaine proportionnalité avec les taux de stabilisation des sources sédimentaires obtenus sur cette même période (Fig. 75). Il faut cependant noter des taux de rétraction comparativement plus élevés sur les bassins à dérochoirs, compte tenu de l'évolution de leurs sources sédimentaires. La mesure de surface en érosion active est en effet un paramètre incomplet pour caractériser l'intensité de la recharge sédimentaire et son évolution récente. La recharge est également fonction de la lithologie et de l'efficacité des connexions qui existent entre les processus de versant et les lits fluviaux. Les dérochoirs, qui constituent certainement, dans les Préalpes du Sud, les formes d'érosion les plus efficaces et les plus productives en terme de recharge sédimentaire grossière des lits, sont présents dans les bassins de l'Esconavette et de la Barnavette. Ainsi, une faible réduction de leur surface active peut avoir des répercussions bien plus importantes en terme de recharge qu'un taux de stabilisation comparativement plus fort affectant des zones de ravinelements moins productives, comme celles observées sur les autres bassins versants. Outre la surface, il faudrait donc également prendre en compte la nature et le type des sources affectées par la reconquête végétale, de façon à établir des liens plus étroits entre l'évolution des versants et des lits fluviaux.

La largeur de la bande active peut également être mise en relation avec la surface relative occupée par les sources sédimentaires dans le bassin versant (Fig. 76). Malgré une certaine dispersion des valeurs, on observe une relation positive qui confirme l'existence d'un lien entre la morphologie fluviale et l'activité géomorphologique des versants. Ce lien ne peut être modélisé faute de points suffisants. En revanche, les données disponibles nous permettent à nouveau de différencier les bassins en fonction de la présence ou non de dérochoirs. Pour des sources sédimentaires équivalentes en surface relative, les bassins à dérochoirs développent des bandes actives plus larges, ce qui confirme l'efficacité de ces formes en terme de recharge sédimentaire.

Ces relations montrent que la morphologie fluviale est contrôlée principalement par la nature et l'étendue des sources sédimentaires et que tout changement qui affecte ces dernières aura nécessairement des répercussions importantes sur la géométrie des bandes actives. La rétraction des bandes actives mesurées après 1950 peut ainsi être mise en relation de façon empirique avec la reconquête végétale affectant les sources sédimentaires.

Tableau 23

Evolution des surfaces relatives des sources sédimentaires sur 6 bassins versants, d'après l'analyse des photographies aériennes de 1948-56 et 1991-96

Bassins versants	Sources sédimentaires en 1948-56 (en % du bassin versant)	Sources sédimentaires en 1991-96 (en % du bassin versant)	Sources sédimentaires stabilisées entre 1948-56 et 1991-96 (en % du bassin versant)	Taux de stabilisation (en %)*
Esconavette	10,59	7,20	3,39	32,01
Barnavette	8,81	5,63	3,18	36,10
Bine	14,82	9,98	4,84	32,66
Soubriou	10,78	9,86	0,92	8,53
Rieu de Montaulieu	24,68	12,37	12,31	49,88
Bordette	28,37	11,62	16,75	59,04

* calculé en faisant le rapport entre les surfaces stabilisées entre les 2 dates et les surfaces actives initiales

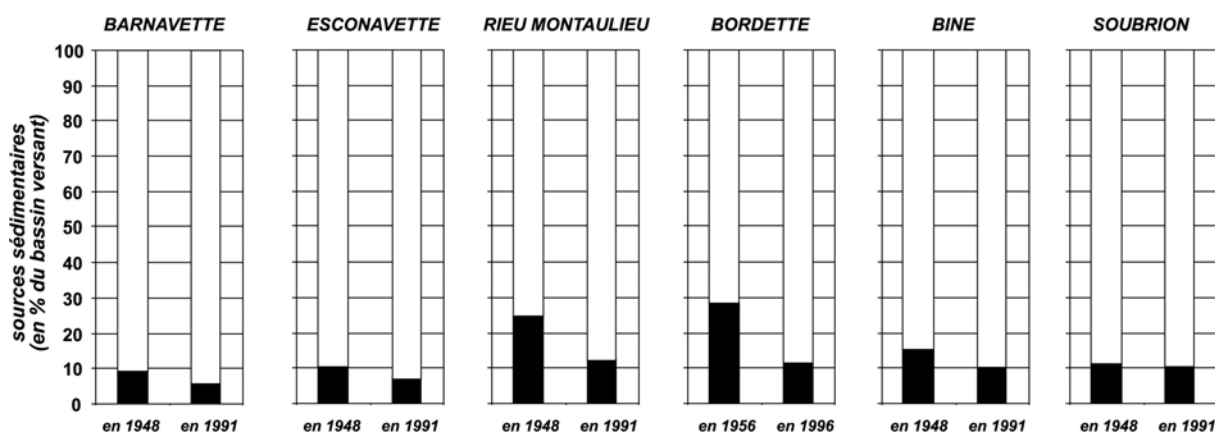


Figure 74

Evolution post-1950 des sources sédimentaires sur 6 bassins versants d'après l'analyse des photographies aériennes (en % de la surface du bassin versant)

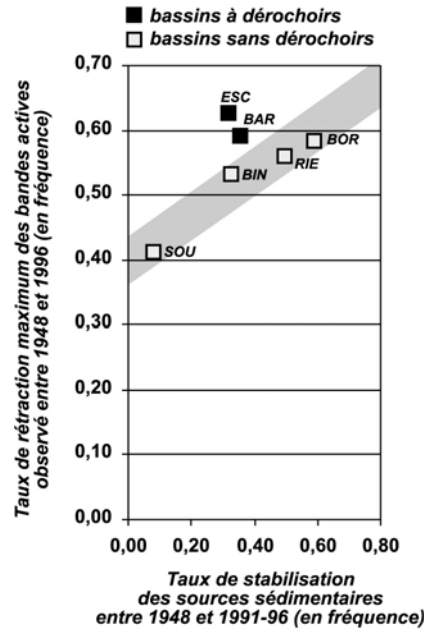


Figure 75

Relation entre le taux de stabilisation des sources sédimentaires et le taux de rétraction des bandes actives sur 6 bassins versants témoins pour la période post-1950

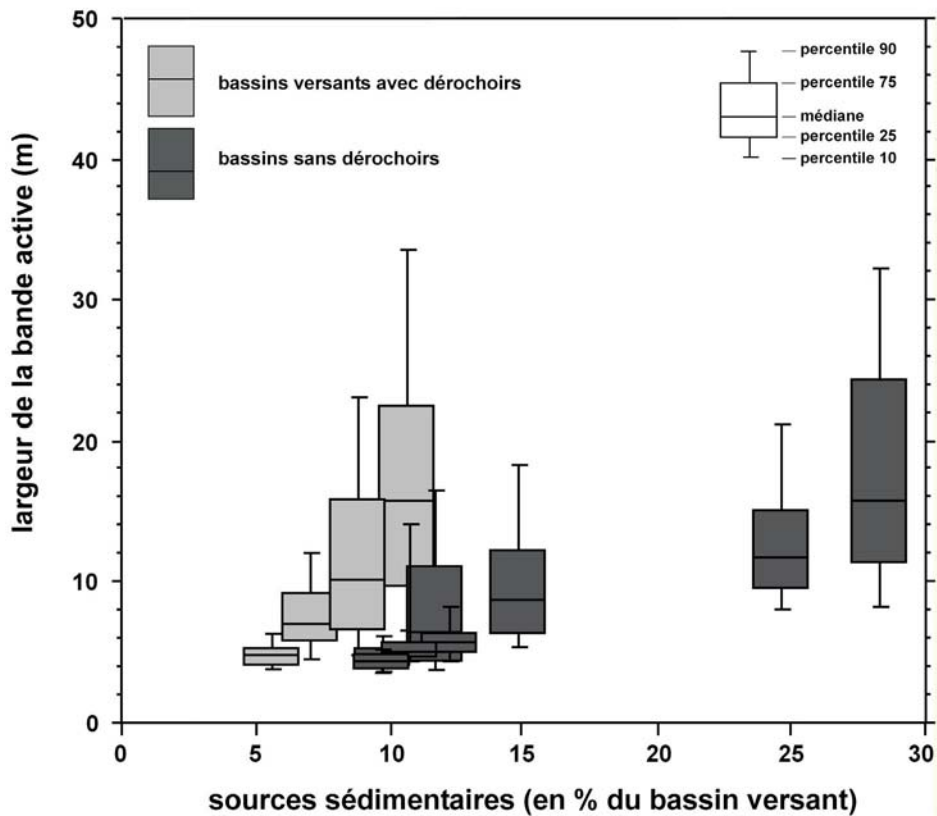


Figure 76

Relation entre la largeur de la bande active et la surface relative occupée par les sources sédimentaires dans le bassin versant; données obtenues sur 6 bassins versants étudiés à 2 dates différentes (Esconavette, Barnavette, Bine, Soubriou, Bordette et Rieu de Montaulieu)

2.1.3. La nature et l'influence des changements de l'occupation du sol

L'analyse historique de l'occupation du sol et de la correction torrentielle démontre l'importance des changements qui ont affecté l'étendue de la couverture végétale à l'échelle des 150 dernières années. La reconquête forestière contemporaine, qui concerne entre 30 et 40 % du territoire d'étude (chiffres qui varient en fonction des sources utilisées), s'explique principalement par la déprise agricole, puisque seulement 20% de ces gains sont directement imputables aux travaux de reboisement. L'abandon des pratiques agricoles et le reboisement spontané consécutif constituent donc des phénomènes majeurs qui ont certainement eu des conséquences bien plus importantes sur le fonctionnement des bassins versants que les travaux de correction torrentielle. Il a en effet été démontré que la rétraction post-1950 des lits fluviaux se produit indépendamment de la présence ou non d'une intervention RTM. En revanche, la déprise rurale affecte l'ensemble du secteur d'étude et elle présente une configuration spatiale similaire à celle des changements fluviaux. En terme de chronologie, il est également plus aisé de relier l'extinction des bandes actives avec la reconquête forestière spontanée qu'avec les grandes périodes de travaux RTM. Celles-ci s'échelonnent entre 1860 et 1910 et elles ne peuvent expliquer l'accélération de la rétraction à partir des années 1950, compte tenu du temps de réaction nécessairement court des petites rivières de montagne. En revanche, les effets de la déprise rurale sur l'occupation du sol, qui s'amorcent vers 1850 d'après les courbes démographiques, s'accroissent à partir des années 1950. Cette chronologie s'accorde bien avec l'installation de la végétation dans les lits fluviaux. Ces constats ne doivent cependant pas nous conduire à exclure une éventuelle réponse des lits fluviaux aux travaux RTM. Si cette dernière existe, elle doit se situer vraisemblablement sur la période 1870-1930. Or, cette période se caractérise également par d'importants ajustements morphologiques pulsatifs, directement contrôlés par les crises hydrogéomorphologiques de la fin du Petit Age Glaciaire [Bravard, 2000a]. Il est donc particulièrement difficile de distinguer l'influence de ces travaux, malgré leur ampleur et leur nature.

Bien qu'il ait été démontré de bonnes correspondances spatiales et chronologiques entre la reconquête forestière spontanée des versants et la rétraction des bandes actives, on doit s'interroger sur la nature de ce lien. A ce stade de la réflexion, plusieurs évidences nous conduisent à prendre parti en faveur d'un mécanisme de type morpho-sédimentaire. Nous avons déjà mentionné plusieurs arguments qui concernent la nature même des changements fluviaux : (1) les relevés dendrochronologiques effectués dans l'ancienne bande active de 1948 démontrent une installation forestière plus ancienne à l'amont, observation conforme à l'hypothèse selon laquelle les bandes actives se sont rétractées au fur et à mesure de la progression vers l'aval du déficit sédimentaire induit par le tarissement des sources sédimentaires ; (2) la configuration morphologique ainsi que la composition spécifique des boisements de l'ancienne bande active montrent bien une dynamique d'incision et de formation de basses-terrasses, en relation avec un phénomène d'incision progressive. Il restait à mettre en évidence l'évolution des sources sédimentaires. Les données recueillies sur 6 bassins versants témoins nous permettent de démontrer un phénomène de tarissement des sources sédimentaires.

La reconquête forestière de ces bassins a clairement affecté les zones de recharge sédimentaire et celles-ci se sont stabilisées après 1950 selon des taux compris entre 8 et 60 %.

Après avoir fait le point sur les changements d'origine anthropique, il faut se pencher sur l'évolution de l'hydrologie, dans la mesure où les résultats exposés précédemment n'excluent pas un éventuel contrôle d'ordre climatique. Dans quelle mesure la stabilisation des sources sédimentaires n'est-elle pas également conditionnée par un probable apaisement climatique récent ? Est-il également possible de mettre en évidence une période de calme hydrologique à partir des années 1950, qui aurait contribué à la revégétalisation des bandes actives ?

2.2. Changements hydrologiques séculaires

2.2.1. Etat de la question

La rétraction des bandes actives a souvent été mise en relation avec la chronique des crues morphogènes. Lorsque ces événements diminuent en fréquence et/ou en intensité, la largeur de la bande active se contracte et la végétation s'installe progressivement dans le lit du cours d'eau [Williams, 1978; Gregory et Madew, 1982; Martin et Johnson, 1987; Gautier, 1992; Rumsby et Macklin, 1994; Allred et Schmidt, 1999; Grams et Schmidt, 2002]. Ces modifications de l'hydrologie peuvent être d'origine anthropique (implantation de barrages, changements de l'occupation du sol) ou climatiques. La rétraction peut également être considérée comme un réajustement morphologique faisant suite à de fortes crues qui ont généré un élargissement brutal de la rivière [Schumm et Lichty, 1963; Pitlick, 1993; Friedman *et al.*, 1996b; Piégay et Salvador, 1997; Sloan *et al.*, 2001]. Dans ce cas, le rétablissement de la largeur initiale du lit est relativement rapide et il peut être acquis en 10 ou 20 ans. Ce temps de relaxation dépend du contexte climatique et de la fréquence des crues morphogènes qui vont suivre la perturbation [Wolman et Gerson, 1978]. Le rétablissement géométrique sera plus rapide en milieu humide, car les conditions nécessaires à l'installation de la végétation dans le lit y sont plus favorables. En revanche, certaines études ont montré qu'une forte saisonnalité des précipitations et des crues peuvent freiner les processus de réajustement et engendrer un temps de relaxation plus long [Lisle, 1981; Sloan *et al.*, 2001].

Est-il possible de mettre en relation la rétraction observée dans les montagnes drômoises avec de telles fluctuations hydrologiques ? L'enregistrement des débits de la Drôme à Luc-en-Diois (1907-2002) constitue l'unique source d'information suffisamment longue pour permettre d'entrevoir d'éventuelles modifications de la fréquence et de l'intensité des crues. Le traitement de cette chronique, complétée par l'analyse historique des crues depuis 1850, montre que la fréquence et l'intensité des maxima annuels étaient supérieures à la fin du 19^e siècle et au début du 20^e siècle [Landon *et al.*, 1998] (Fig. 77A). Ce constat est confirmé dans le bassin du Bez où une analyse historique des phénomènes climatiques à caractère violent démontre la recrudescence de fortes crues, souvent estivales, entre 1800 et 1820 et entre 1840 et 1870 [Bravard, 2000a] (Fig. 77B). L'auteur met également en évidence l'occurrence d'une crise orageuse extrême en 1856, qui, complétée par de fortes crues estivales jusqu'en 1870, aurait engendré une phase d'exhaussement continue des lits fluviaux jusqu'à la fin du 19^e siècle. Cette période aurait été relayée ensuite par une phase de réajustement des lits par incision. L'analyse de la chronique des débits de l'Eygues à la station du Pont-de-la-Tune [Landon *et al.*, 1999] a également montré une diminution de l'intensité des crues maximales annuelles entre les périodes 1920-1939 et 1964-1980. La période 1964-1980 se caractérise en effet par l'absence d'événements hydrologiques supérieurs à Q_5 . Cette étude montre également une diminution du nombre annuel moyen de jours où 0,5 Q_{pb} (considéré comme le débit seuil de mise en mouvement à l'échelle régionale) est atteint.

Toutes ces études confirment une raréfaction séculaire des événements hydrologiques extrêmes, mise parfois en relation avec la sortie progressive du Petit Age Glaciaire, que Bravard [2000a] propose de rebaptiser le *Petit Age de la Torrentialité* dans les Alpes du Sud. Cette évolution hydrologique, combinée à la reconquête forestière des versants et aux travaux de correction torrentielle, peut expliquer la stabilisation progressive des grandes bandes de tressage de la fin du 19^e siècle. En revanche, elle ne permet pas de comprendre la rétraction accélérée des bandes actives mesurée à partir des années 1950. Si ce phénomène est gouverné par l'évolution des crues, nous devrions être en mesure de démontrer l'existence de changements hydrologiques importants à partir de 1950. Nous proposons donc ici d'examiner la chronique des débits de la Drôme à Luc-en-Diois afin d'évaluer l'évolution de la fréquence, de l'intensité et de la répartition saisonnière des crues depuis 1907.

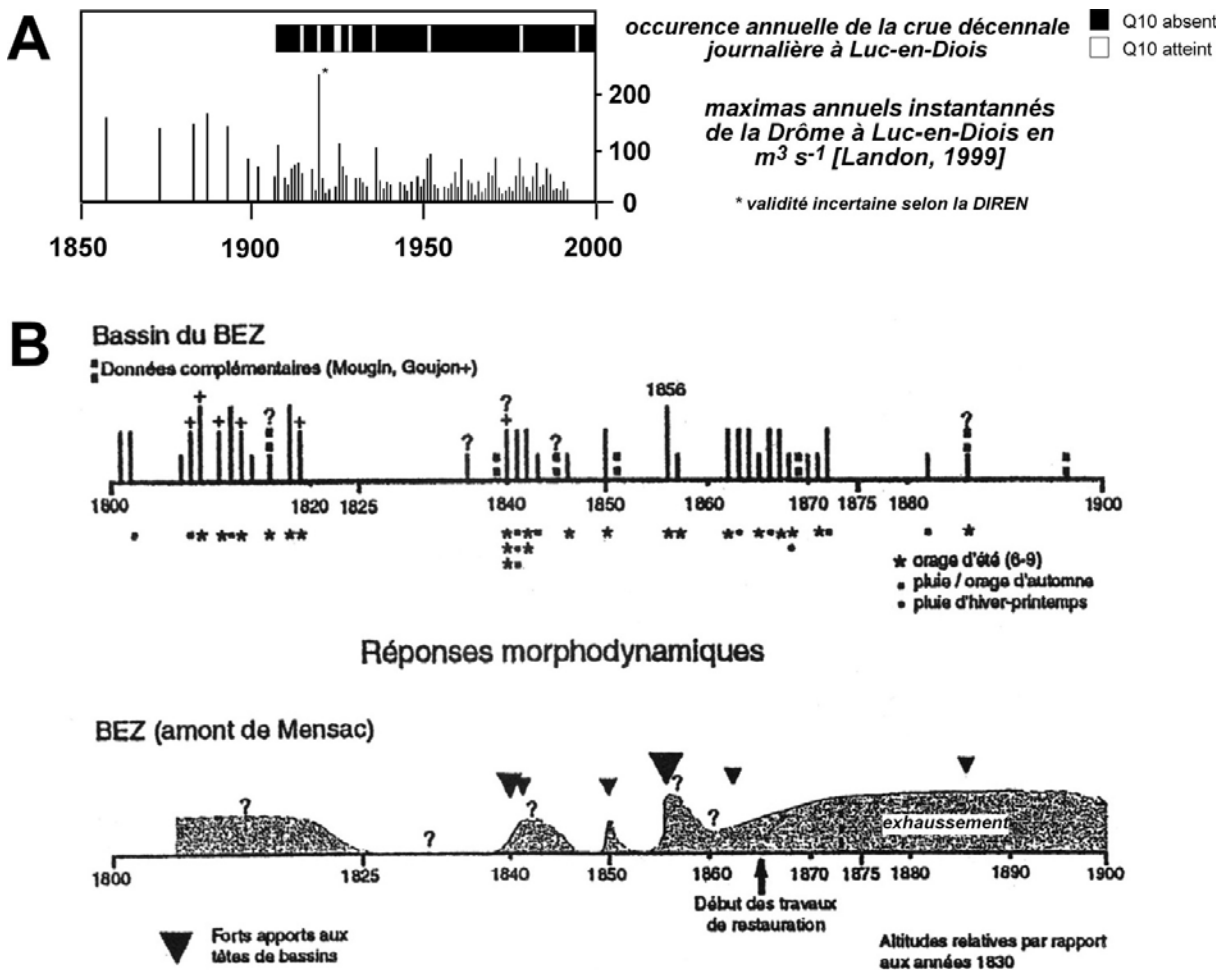


Figure 77
Evolutions hydrologiques séculaires dans les Préalpes du Sud ; (A) : la Drôme à Luc-en-Diois [d'après Landon, 1999, modifié]; (B) : crues torrentielles et réponses morphodynamiques dans le bassin du Bez [d'après Bravard, 2000a]

2.2.2. Approches méthodologiques

La station hydrométrique de Luc-en-Diois, en service depuis 1907, constitue la principale source d'information pour l'étude de l'évolution des crues de la Drôme. Elle est actuellement gérée par la DIREN qui assure l'acquisition, la mise en forme et le traitement des données. La chronique des débits journaliers démarre en 1907, alors que l'enregistrement des débits instantanés remonte à 1966. La surface du bassin versant à la station est de 196 km².

L'évolution de la fréquence des crues a été étudiée à partir de la chronique des débits journaliers. Les courbes de fréquence des crues, ajustées selon une distribution Log-Pearson Type III, ont été établies à partir de la série partielle des débits maximums journaliers pour 3 périodes de 30 ans ou plus : (1) 1907-1939, (2) 1940-1969 et (3) 1970-2001. La distribution Log-Pearson Type III a été retenue à l'issue d'une évaluation graphique des différentes distributions de probabilités généralement utilisées en hydrologie. Ce test a été effectué à partir du logiciel *Aquapark* (programme *FLOODFRQ*) [Gordon *et al.*, 1992]. L'essentiel de la rétraction des bandes actives se produisant entre 1940 et 1970, nous devrions observer une diminution de la fréquence des crues sur la période 1940-1969, dans l'hypothèse d'un contrôle hydrologique sur l'évolution des largeurs. La série partielle a été préférée à la série des maxima annuels, dans la mesure où elle procure une évaluation plus fine des débits de fréquence forte, notamment lorsque le régime hydrologique se caractérise par une forte variabilité inter-annuelle et par des montées de crues rapides, ce qui est généralement le cas des rivières à influence méditerranéenne [Gregory et Madew, 1982]. Le débit seuil retenu correspond à la plus faible crue annuelle de la série (7,60 m³ s⁻¹). Les pics de crue ont été sélectionnés à partir de l'examen des hydrogrammes annuels, de façon à préserver l'indépendance des événements statistiques. Ces protocoles de mesure sont conformes aux recommandations généralement admises dans l'utilisation des séries partielles [Dunne et Leopold, 1978; Gordon *et al.*, 1992].

En complément de l'analyse comparative des courbes de fréquence, nous avons étudié l'évolution du nombre de crues par années et par décennies, à partir de l'ensemble des événements de la série partielle (soit 711 crues au total). L'évolution du nombre de jours de crue par décennies a également été étudié, en considérant qu'un jour de crue se produit lorsque le débit journalier est supérieur ou égal à la crue de fréquence 1,5 ans, calculée à partir de la série des maxima annuels journaliers selon un ajustement de Gumbel (21,50 m³ s⁻¹). L'évolution de la répartition mensuelle des crues sur les périodes 1907-1950 et 1950-2001 a été analysée à partir des événements inclus dans la série partielle.

2.2.3. Evolution des crues de la Drôme à Luc-en-Diois depuis 1907

L'évolution de la fréquence des crues de la Drôme à Luc-en-Diois au cours du 20^e siècle montre une très nette tendance à la diminution du nombre de jours de crue (Fig. 78A). On passe ainsi de 30 à 40 jours de crue par décennie au début du siècle à des valeurs comprises entre 10 et 20 jours actuellement. Cette tendance est confirmée par l'évolution du nombre d'événements par décennies qui chute

à partir des années 1950 et enregistre une baisse de près de 50 % par rapport au début du 20^e siècle (Fig. 78B). La variabilité inter-annuelle de ce même indicateur montre une diminution qui s'amorce dans les années 1940 et semble se stabiliser dans les années 1970 (Fig. 78C).

Ces tendances très nettes contrastent avec les résultats précédemment obtenus à partir de la chronique des maxima annuels journaliers, qui montre une relative stationnarité à l'échelle du 20^e siècle (Fig. 77A). Faut-il en conclure que les intensités de crue sont restées stables malgré la baisse des fréquences ? La comparaison des courbes de fréquence démontre que les intensités de crue ont également diminué, notamment pendant la période 1940-1969 (Fig. 79). Cette baisse ne concerne véritablement que les crues supérieures à Q₅, tandis que les petites crues n'ont pas subi d'évolution aussi marquée (Tab. 24). Il est également intéressant de constater que la fréquence des crues moyennes (comprises entre Q10 et Q50) réaugmente sur la période 1970-2001, pour se rapprocher du niveau de la période initiale.

La répartition mensuelle des crues au cours du 20^e siècle dévoile également quelques changements (Fig. 80). Les crues d'automne (septembre à décembre) étaient plus nombreuses dans la première moitié du 20^e siècle, tandis que la période 1950-2001 montre une très nette augmentation de la fréquence des crues d'hiver (janvier, février). La proportion des crues de printemps ne montre pas de grandes différences entre les deux périodes. Ces observations suggèrent un décalage progressif du régime des crues qui semble indiquer un affaiblissement des remontées d'air humide en provenance de la Méditerranée [Piégay *et al.*, sous presse]. L'hydrologie de la Drôme aurait ainsi perdu de son caractère méditerranéen au cours du 20^e siècle, constat également réalisé sur le Buëch, où la raréfaction des crues d'automne est mentionnée [Gautier, 1992]. Il est également intéressant de constater la quasi inexistence des crues d'été au cours du 20^e siècle. Celles-ci se font même de plus en plus rares après 1950. Ceci est d'autant plus étonnant lorsqu'on considère l'importance des crues orageuses estivales du 19^e siècle [Bravard, 2000a]. D'autre part, leur influence ne semble pas s'être concentrée sur les petits organismes torrentiels décrits dans le bassin du Bez, puisqu'ils ont été à l'origine de crues extrêmement violentes sur les grandes rivières (crue du 13 août 1868 sur l'Eygues, du 24 au 26 août 1814 et du 27 juillet 1892 sur le Roubion).

Tableau 24

Fréquences des crues de la Drôme à Luc-en-Diois calculées pour différentes périodes, à partir de la série partielle des maxima journaliers, selon un ajustement Log-Pearson Type III

Périodes	1907-1939	1940-1969	1970-2001
Q1,05	7,72	7,60	7,76
Q2	12,86	12,56	12,85
Q5	20,98	18,90	20,12
Q10	29,27	24,57	27,08
Q50	60,79	42,58	51,33
Q100	82,61	53,23	66,88

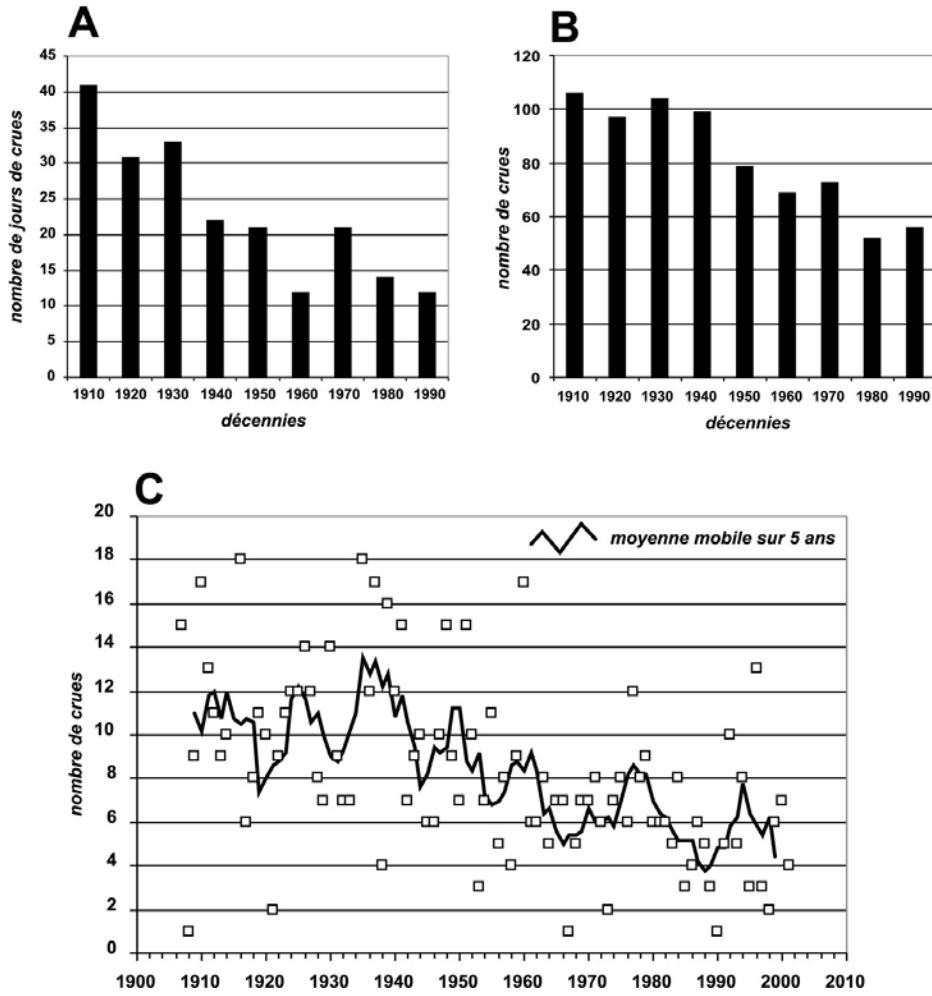


Figure 78

Evolution de la fréquence des crues de la Drôme à Luc-en-Diois depuis 1907 ; A : évolution décennale du nombre de jours où le débit maximum journalier a été supérieur au débit de fréquence 1,5 ans ; B : évolution décennale du nombre d'événements de crue (déterminée à partir de la série partielle des débits journaliers) ; C : évolution annuelle du nombre d'événements de crue (déterminée à partir de la série partielle des débits journaliers)

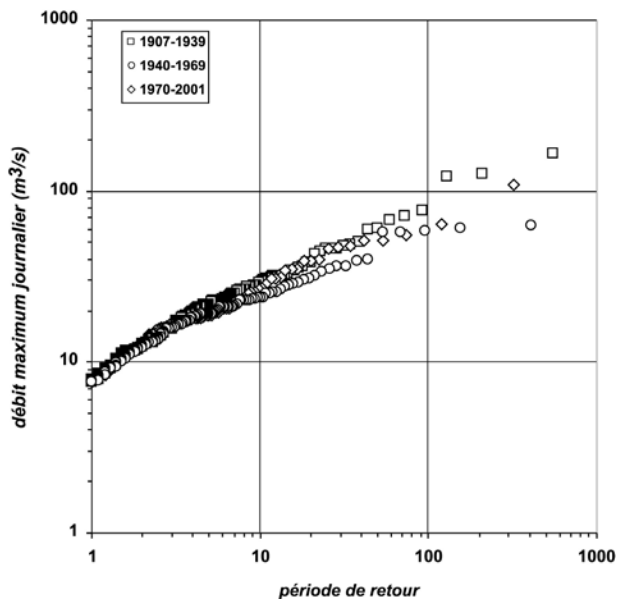


Figure 79

Courbes de fréquence des crues de la Drôme à Luc-en-Diois pour différentes périodes (courbes calculées à partir de la série partielle des débits maximums journaliers, selon un ajustement Log-Pearson Type III)

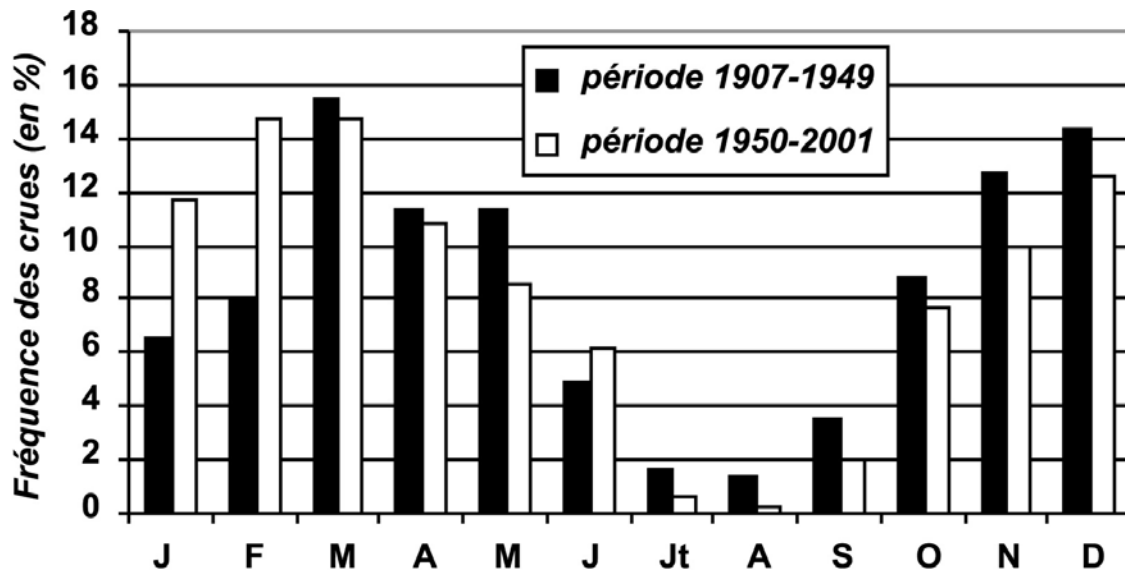


Figure 80

Répartition mensuelle des crues de la Drôme à Luc-en-Diois pour les périodes 1907-1949 et 1950-2001 (les crues sélectionnées correspondent à la série partielle des débits maximums journaliers)

2.2.4. La nature et l'influence des changements hydrologiques

L'analyse de la chronique des crues de la Drôme à Luc-en-Diois révèle l'absence de fortes crues dans les années 1940 ou 1950 qui auraient été susceptibles d'accroître substantiellement la largeur des bandes actives et d'entraîner un réajustement par végétalisation des lits, tel que celui décrit sur l'Ubaye après la crue millénaire de 1957 [Piégay et Salvador, 1997]. La rétraction post-1950 des bandes actives ne peut donc être considérée comme un rétablissement géométrique qui fait suite à une perturbation de type pulsatif. Il s'agit plutôt d'un ajustement graduel à des modifications plus progressives des variables de contrôle. Il est d'autre part intéressant de constater que les fortes crues du début des années 1990, dont les fréquences ont été très proches de la crue centennale, n'ont eu qu'un impact relativement modéré sur la géométrie fluviale. L'exemple du Roubion est très démonstratif dans la mesure où les événements extrêmes de 1960 (proche de la crue cinquantiennale) et 1993 (proche de la crue centennale) n'ont pas perturbé la tendance à la rétraction, particulièrement marquée à partir des années 1950 [Liébault et Piégay, 2001].

En revanche, l'évolution de la fréquence et de l'intensité des crues à l'échelle du 20^e siècle montre très nettement un changement à partir du début des années 1950, qui s'accorde chronologiquement avec la rétraction des bandes actives. La diminution du nombre de crues, particulièrement marquée pour les événements supérieurs à Q_5 , pourrait ainsi engendrer une diminution de la fréquence de mobilisation des bancs de graviers et une installation progressive de la végétation dans les lits fluviaux. Ce type de mécanisme est observé aujourd'hui sur plusieurs affluents de la Drôme, au niveau desquels un suivi des crues a été mis en place depuis 1997. Des groupements arbustifs s'installent sur le sommet des bancs de graviers depuis le printemps 2001, date de la dernière crue morpho-

gène (Fig. 81). Les petites crues qui se sont produites depuis n'ont pas été suffisamment puissantes pour remanier les bancs de graviers en cours de végétalisation. Elles ont cependant activé une dynamique de sédimentation limoneuse qui devrait perdurer tant que la végétation arrivera à se maintenir et à se renforcer. Il est possible d'imaginer que ce maintien sera d'autant plus durable que la période de calme hydrologique perdurera. Plus cette période sera longue et plus la crue nécessaire au remaniement de la végétation devra être importante. Cette colonisation se fait quasi exclusivement par l'aulne blanc (*Alnus incana*), le peuplier noir (*Populus nigra*) et le saule pourpre (*Salix purpurea*). Ces espèces, au comportement pionnier de type mésohygrophile, indiquent la présence d'une nappe alluviale relativement proche de la surface. Aucune pousse de pin sylvestre n'a été observée sur ces sites de colonisation récente, bien que plusieurs semenciers soient présents sur les basses terrasses avoisinantes. Ces observations montrent que l'ajustement morphologique au tarissement des crues se fait principalement par colonisation végétale des atterrissements de graviers et exhaussement par sédimentation fine. Ces mécanismes conduisent progressivement à la construction d'une plaine alluviale et ils peuvent être accompagnés d'une légère incision par concentration de l'écoulement de crue dans le chenal d'étiage [Tsujiimoto et Kitamura, 1996].

Plusieurs arguments nous conduisent à considérer le changement hydrologique comme une explication complémentaire mais non déterminante de la rétraction post-1950 des bandes actives. Nous avons en effet démontré que les mécanismes qui conduisent à la stabilisation de l'ancienne bande active de 1948 sont bien différents de ceux induits par une simple modification de la fréquence des crues. La présence du pin sylvestre et l'absence de sédimentation limoneuse sur les basses terrasses de 1950 indique plutôt une dynamique de déconnexion par incision, antérieure à l'installation de la végétation. D'autre part, nous avons démontré que la chronologie du boisement de l'ancienne bande active de 1948 se caractérise par des différences marquées entre les sites amont et aval. Ce constat ne joue pas en faveur d'un contrôle hydrologique prépondérant, dans la mesure où celui-ci aurait dû s'exprimer de façon plus ou moins uniforme sur l'ensemble du réseau hydrographique. Il est cependant possible d'expliquer l'apparente synchronicité de l'installation forestière sur les affluents et les cours d'eau principaux, signalée parfois [Liébault et Taillefumier, 2000; Liébault et Piégay, 2002], par la coexistence de plusieurs ajustements qui vont s'exprimer simultanément à partir des années 1950. Les changements de l'occupation du sol des plaines alluviales liés à l'abandon de certaines pratiques agro-pastorales (exploitation du bois, mise en pâturage des bordures de rivières), combinés à la diminution de la fréquence des crues, ont certainement contribué au boisement du lit de la Drôme et de l'Eygues [Piégay, 1995; Liébault et Piégay, 2002; Piégay *et al.*, 2003], alors que les affluents, plus sensibles aux modifications qui affectent les versants, se sont ajustés principalement au tarissement des sources sédimentaires. Il faut enfin mentionner le cas du Buëch, rivière torrentielle dont le contexte physique et humain est comparable à celui des bassins drômois. Ce cours d'eau se caractérise par une forte rétraction post-1950 sans qu'aucune modification de la fréquence des crues au cours du 20^e siècle n'ait pu être mise en évidence à ce jour [Liébault et Piégay, 2002].

Même s'il apparaît que les contrôles hydro-climatiques n'ont eu qu'une place secondaire dans l'évolution morphologique observée après 1950, ceci n'a pas été toujours le cas. Lorsque l'on considère une échelle de temps plus longue, la relation entre les deux phénomènes devient plus évidente, bien qu'elle résulte en grande partie de conditions anthropiques particulières. Il est en effet admis que les grandes bandes de tressage du 19^e siècle, observées également dans les montagnes drômoises, doivent être associées aux crues extrêmes de l'époque, qui se sont produites dans un contexte de grande sensibilité géomorphologique lié à l'état de dégradation de la couverture végétale [Bravard et Peiry, 1993; Bravard, 2000a]. La rétraction observée entre la fin du 19^e siècle et 1950 doit certainement être interprétée comme une phase de réajustement du lit aux crises érosives qui se sont succédées au cours du 19^e siècle. Les cours d'eau ont vraisemblablement rétabli assez rapidement une nouvelle géométrie en équilibre avec des crues moins violentes, plus espacées dans le temps et des apports sédimentaires qui se tarissent sous l'effet conjoint des travaux RTM et d'un apaisement climatique. Si on s'appuie sur les différentes études conduites sur les ajustements post-crises [Knighton, 1989; James, 1991; Pitlick, 1993; Trimble, 1995; Shimazu et Oguchi, 1996], ce rétablissement a impliqué une phase d'incision progressive dans les nappes caillouteuses du 19^e siècle. Il est possible d'interpréter ainsi l'incision observée sur plusieurs affluents de la Drôme au début du 20^e siècle (Fig. 54).

Il faut enfin s'interroger sur la nature des changements hydrologiques observés. Ces modifications sont-elles d'origine climatique ou anthropique ? L'influence du taux de boisement sur les pics de crue est aujourd'hui largement reconnue. Plusieurs études récentes ont notamment mis en évidence que l'effet d'atténuation des pics joue principalement sur les crues de faible intensité et de fréquence forte [Jones et Grant, 1996; Beschta *et al.*, 2000]. L'analyse des hydrogrammes de crue de la Drôme à Luc-en-Diois, réalisée dans le cadre d'une étude sur l'influence hydro-géomorphologique du reboisement [Piégay *et al.*, sous presse], montre que les pointes de crue deviennent de moins en moins marquées à partir des années 1950. Cette atténuation est attribuée à l'augmentation du taux de boisement, qui est passé de 17 % en 1835 à 55 % en 1988. D'autre part, il est intéressant de noter que cette baisse de la fréquence et de l'intensité des crues observée à partir des années 1950 ne s'accorde pas avec l'évolution du nombre de jours où les précipitations ont été supérieures à 30 mm, étudiée par Landon [1999] sur la période 1950-2000. Les différentes courbes obtenues sur plusieurs stations du Diois ne montrent pas d'évolution bien nette. Ce constat joue en faveur d'un contrôle anthropique sur l'hydrologie.

En revanche, les changements d'occupation du sol ne peuvent expliquer à eux seuls l'ensemble des modifications hydrologiques mises en évidence. L'évolution de la répartition saisonnière des crues ainsi que la diminution de leur fréquence, qui concerne surtout les événements d'intensités moyennes à fortes, doivent être attribuées à un changement du régime des précipitations. La disparition des crues d'été entre le 19^e et le 20^e siècle, ainsi que le décalage vers l'hiver des crues d'automne au cours du 20^e siècle pourraient indiquer une migration vers le sud des influences méditerranéennes.

nes, particulièrement marquée dans le Diois, espace de transition entre les zones climatiques méditerranéennes et continentales [Piégay *et al.*, sous presse].



Figure 81
Végétalisation récente de la bande active de l'Esconavette et de la Barnavette qui fait suite à une période de calme hydrologique entre le printemps 2001 et l'été 2002

3. Synthèse explicative des changements fluviaux contemporains

3.1. La période 1850-1950

Malgré l'insuffisance des sources documentaires pour caractériser la complexité temporelle de l'ajustement morphologique sur cette période, nous avons pu démontrer une tendance à la rétraction dans la mesure où les bandes actives visibles sur les photographies aériennes de 1948 sont nettement rétrécies par rapport à celles cartographiées à la fin du 19^e siècle (Fig. 46). D'autre part, plusieurs sites ont révélé que cette rétraction ancienne s'accompagne de l'édification de basses terrasses. Les lambeaux reboisés de l'ancienne bande active de 1948 sont souvent emboîtés dans une surface topographique qui correspond à l'espace de divagation fluvial de la fin du 19^e siècle (Fig. 56). Les relevés dendrochronologiques effectués sur cette surface montrent qu'elle s'est stabilisée dans les années 1920, bien que sur certains sites, l'exploitation agro-pastorale des fonds de vallée expliquent la relative jeunesse des boisements rencontrés. Cette phase d'incision est également documentée par les données d'archive sur plusieurs rivières (Comane, Meyrosse, Barnavette et Esconavette) (Fig. 54).

De tels changements ont-ils été observés sur d'autres rivières pour cette même période ? Piégay et Salvador [1997] ont mis en évidence la colonisation de la bande active de l'Ubaye par le pin sylvestre dans les années 1920. Ils attribuent cette rétraction aux travaux de correction torrentielle conduits entre 1880 et 1900 sur les têtes de bassin situées à 15 km en amont du site étudié. Rinaldi *et al.* [1997] suggèrent la présence d'une phase d'incision de la rivière Arno dans les années 1900-1910, qu'ils mettent en relation avec le reboisement des versants. Bravard [2000a] montre également un changement de dynamique morpho-sédimentaire dans le bassin du Bez à partir de 1900, interprété comme un réajustement de nature climatique qui conduit à la stabilisation des nappes de graviers progradantes initiées par les différentes crises érosives qui s'échelonnent entre 1856 et 1890.

Doit-on attribuer ces anciennes phases d'incision et de rétraction aux travaux de correction torrentielle ou à un ajustement de nature hydro-climatique. La chronique hydrologique de Luc-en-Diois complétée par les données d'archives illustre bien l'occurrence à intervalles courts de très fortes crues durant le 19^e siècle [Landon, 1999]. Une telle succession d'événements extrêmes n'a plus été observée depuis lors. Il est d'autre part remarquable de constater que la plupart de ces crues correspondent à des orages d'été [Bravard, 2000a], alors que les relevés hydrologiques du 20^e siècle à Luc-en-Diois révèlent l'absence de crues estivales. D'autre part, ces épisodes extrêmes se sont produits dans un contexte de grande sensibilité géomorphologique des versants, du fait de l'état très dégradé de la couverture végétale. Leur efficacité en terme d'impact sur la morphologie des lits fluviaux a donc été largement amplifiée par l'état des bassins versants. Il faut donc considérer que les grandes bandes actives de la fin du 19^e siècle sont des formes ajustées à un contexte de crise à la fois climatique et anthropique.

La stabilisation de ces formes coïncide avec la mise en place des grands programmes de correction

torrentielle. Nous avons montré que ces travaux ont été conduits entre 1860 et 1910 dans les montagnes drômoises. Il est également intéressant de constater que les affluents de l'Eygues présentent des bandes actives plus larges sur les photographies aériennes de 1948 par rapport aux affluents de la Drôme. Ce constat est peut être à mettre en relation avec l'absence d'une correction torrentielle aussi aboutie que celle qui a été conduite dans le bassin de la Drôme (Fig. 69), bien qu'il faille également mentionner l'influence du climat et de la lithologie. Le bassin de l'Eygues présente une couverture végétale plus dégradée du fait de conditions d'aridité plus prononcées. Son bassin plus marneux présente également une plus grande instabilité qui se manifeste par des glissements de terrains plus fréquents. Nous observons également des signes évidents d'incision au début du 20^e siècle sur plusieurs rivières dont les bassins ont fait l'objet d'importants travaux RTM (Esconavette, Barnavette, Archiane). Les ajustements mis en évidence sur la Sure (Fig. 53) et l'Esconavette (Fig. 54D) suggèrent une incision de nature progressive, qui oblige à considérer une réduction des apports solides depuis l'amont. D'importants ouvrages de rétention RTM ont été construits dans ces 2 bassins. Un enfoncement du lit est également observé sur la Comane et la Meyrosse dans les années 1890, mais il se produit avant le démarrage de la correction torrentielle. Il faut donc faire valoir ici un déstockage post-crise à condition d'admettre la prépondérance des forçages externes par rapport aux contrôles directs sur l'évolution du lit. L'incision observée sur ces 2 sites n'est peut être qu'un phénomène localisé, lié à des interventions anthropiques, et il serait prématuré d'en déduire une interprétation causale synthétique. Des recherches complémentaires devront être conduites pour éclaircir l'origine de l'extinction torrentielle observée avant 1950.

3.2. La période 1950-2000

Les changements fluviaux précédemment décrits vont ensuite être relayés, à partir des années 1940 ou 1950 en fonction des bassins, par une nouvelle phase de rétraction d'une ampleur inégalée depuis la dernière séquence de crise torrentielle de la seconde moitié du 19^e siècle. Cette dernière étape du processus de stabilisation des lits fluviaux contribue à faire disparaître les zones de tressage, qui s'étaient maintenues sur plusieurs affluents. Ce style fluvial, autrefois très répandu sur les petites rivières torrentielles du Diois et des Baronnies, peut être considéré aujourd'hui comme un héritage du passé, une forme relictuelle en équilibre avec des conditions d'érosion révolues dans la plupart des bassins versants [Bravard et Peiry, 1993; Bravard, 2000b et 2002]. La majorité des bandes de tressage encore visibles sur les photographies aériennes de 1948 apparaissent aujourd'hui sous la forme de basses terrasses reboisées (Fig. 41).

Quels sont les paramètres qui ont concourus à cette étape ultime de stabilisation des bandes actives ? Les principaux facteurs potentiels sont le climat et la reconquête forestière, d'origine anthropique. Les différentes investigations conduites dans le cadre de cette thèse permettent d'établir un modèle explicatif de ces changements récents (Fig. 82 ; Tab. 25). Il apparaît de plus en plus clairement que les rivières se sont ajustées à la reconquête forestière massive liée à la déprise rurale. Il existe

de bonnes correspondances chronologique et spatiale entre ces 2 phénomènes. Plusieurs enchaînements causaux peuvent être proposés : (1) le reboisement des versants entraîne une cicatrisation progressive des zones d'érosion et le tarissement consécutif des sources sédimentaires ; les rivières s'incisent alors progressivement dans leurs anciennes bandes actives qui se transforment à terme en basses terrasses boisées (hypothèse morpho-sédimentaire); (2) le reboisement des versants atténue les pics de crue et induit ainsi une rétraction des bandes actives qui se boisent du fait d'un remaniement hydrologique atténué (hypothèse hydrologique) ; (3) la reconquête forestière, qui concerne les versants mais également les fonds de vallée, modifie les conditions d'écoulement dans les plaines alluviales (augmentation de la rugosité des berges) et favorise l'installation de la végétation dans les bandes actives (hypothèse hydraulique) ; (4) la reconquête forestière se nourrit d'elle-même par dissémination naturelle des graines dans le paysage, si bien qu'elle finit par affecter l'ensemble des terrains progressivement abandonnés par l'homme et les processus naturels de régénération hydrologique et géomorphologique (hypothèse biologique).

Les différents résultats obtenus lors de nos investigations nous conduisent à considérer l'hypothèse morpho-sédimentaire comme la plus probante (Tab. 25). La stabilisation des sources sédimentaires, l'incision progressive depuis les têtes de bassin et le processus d'édification de basses terrasses, la déprise rurale et ses effets sur le taux de boisement qui s'accroissent après 1950, tous ces arguments convergent vers une modification du bilan sédimentaire des bassins qui a conduit à la mise en place d'une nouvelle morphologie. La rétraction et l'incision des lits fluviaux se produit sur l'ensemble des affluents qui disposaient de grandes bandes actives en 1948. Un cas particulier a été observé. Il s'agit de la Haute-Drôme, qui a pourtant été affectée par un reboisement important de son bassin. Il faut invoquer ici un contexte structural original, lié à un contrôle aval sur les conditions d'évacuation des sédiments. La pente du fond de vallée est contrôlée par le glissement du Claps. Les matériaux ont donc tendance à s'accumuler sous l'effet d'une capacité de transport déficitaire, induite par les faibles pentes du fond de vallée [Liébault et al., 2002a]. Le déficit sédimentaire induit par le reboisement des versants a vraisemblablement été compensé par des conditions favorables au stockage des matériaux dans le fond de vallée.

La diminution de la fréquence et de l'intensité des crues, partiellement d'origine climatique, ainsi que l'ajustement au boisement des plaines alluviales sont des explications complémentaires dans la mesure où elles permettent de rendre compte de l'homogénéité régionale du phénomène de rétraction des lits. Il faut cependant relativiser cette homogénéité sur les petites rivières torrentielles, dans la mesure où les analyses de détail révèlent une certaine complexité de la végétalisation des bandes actives, en grande partie contrôlée par les indicateurs morphologiques (gradient amont-aval, niveaux de terrasses). Il faut également distinguer sans doute plusieurs types de rétraction, car sous le même terme se cachent parfois des processus bien différents. La rétraction par formation de basses terrasses [Germanoski et Harvey, 1993] est en effet bien différente de celle qui procède par construction de plaine alluviale [Schumm et Lichty, 1963], et il est bien possible que les deux phénomènes

nes se soient produits de façon concomitante dans certains bassins drômois. Sur la Bédouze, la rétraction post-1950 s'est faite à la fois par la formation de basses terrasses à pins sylvestres, et par la construction plus récente d'une plaine alluviale à aulnes blancs (Fig. 56). Il est donc possible d'expliquer la simultanéité de l'ajustement par rétraction observée sur les affluents et les cours d'eau principaux [Liébault et Piégay, 2002], parfois présentée comme un argument défavorable à l'explication par le tarissement des sources. Cette simultanéité pourrait résulter de la coexistence de plusieurs ajustements qui aboutissent à réduire la largeur des bandes actives.

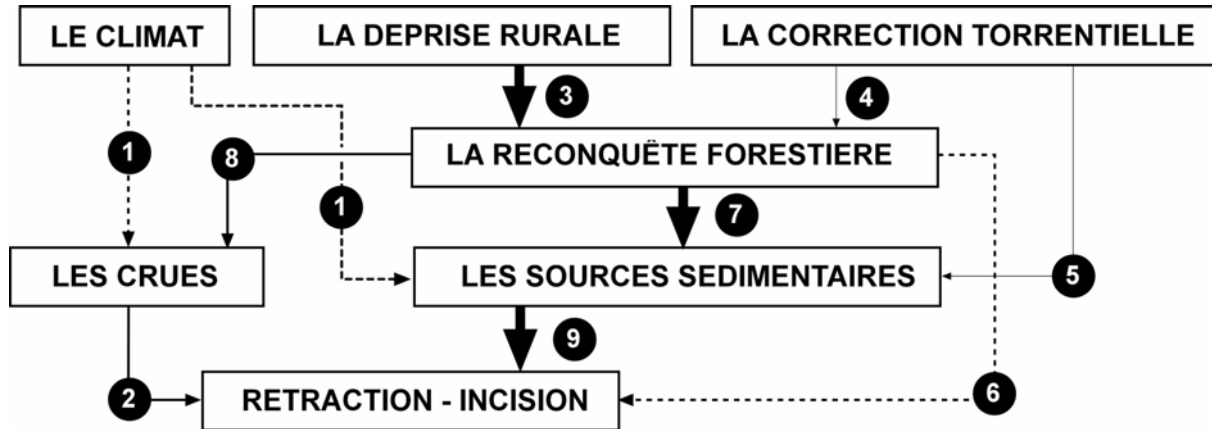
En l'état actuel des connaissances, aucun lien n'a pu être démontré entre le tarissement des sources sédimentaires et une éventuelle modification du régime des précipitations. Les chroniques climatiques du Diois ne montrent pas d'évolution très nette de la fréquence des averses supérieures à 30 mm sur la période 1950-2000 [Landon, 1999], alors qu'une transformation majeure de la morphologie des rivières se produit pendant cette période. Ce constat renforce la primauté des contrôles anthropiques sur l'évolution récente de la torrencialité des montagnes drômoises.

L'histoire morphologique récente des rivières torrentielles drômoises illustre toute l'importance que revêt l'évolution de l'occupation du sol sur le fonctionnement des hydrosystèmes. Les sociétés humaines exercent un contrôle majeur sur l'état de la couverture forestière et elles peuvent être à l'origine de changements fluviaux remarquables, comme l'est la disparition sans doute prématurée du tressage torrentiel. Cet exemple confirme également l'importance de la végétation sur les conditions de recharge sédimentaire, thème généralement abordé selon un scénario inverse, qui consiste à démontrer comment les rivières se sont transformées sous l'effet d'afflux sédimentaires liés au déboisement des versants [Lyons et Beschta, 1983; Madej et Ozaki, 1996; Brooks et Brierley, 1997; Lisle et Napolitano, 1998; Page *et al.*, 2000]. Outre les questions de gestion que ces problèmes suscitent, notamment dans la Drôme où l'incision accélérée du cours d'eau principal sous l'effet des extractions de graviers pose le délicat problème des potentialités actuelles de recharge, ils révèlent également le problème de la disparition de paysages remarquables et de la nécessité ou non de mettre en œuvre des politiques de conservation de certaines dynamiques en cours d'extinction. Dans le cas de la disparition des plaines de tressage, ce type de politique peut certainement trouver une justification dans le fait que le phénomène est principalement d'origine anthropique.

Tableau 25

Synthèse des arguments favorables et défavorables aux différentes relations entre les paramètres du modèle explicatif des changements fluviaux post-1950 (Fig. 82)

Relations	Arguments favorables	Arguments défavorables
Climat - Crues	(1) Modification de la saisonnalité des crues (2) Diminution de la fréquence et de l'intensité des crues moyennes et fortes	(1) Stationnarité des chroniques de précipitations supérieures à 30 mm [Landon, 1999]
Climat – Sources sédimentaires		(1) Stationnarité des chroniques de précipitations supérieures à 30 mm [Landon, 1999]
Crues – Rétraction et incision	(1) bonne correspondance chronologique entre les 2 phénomènes	(1) absence de signes forts d'une reconstruction de plaine alluviale
Déprise rurale – Reconquête forestière	(1) La déprise rurale explique 80% de la reconquête forestière contemporaine du territoire d'étude	
Correction torrentielle – Reconquête forestière		(1) Les reboisements RTM concernent principalement la première moitié du 20 ^e siècle
Correction torrentielle – Rétraction et incision (par l'intermédiaire de la stabilisation des sources sédimentaires)		(1) La rétraction des bandes actives s'observe indépendamment de l'intervention RTM (2) Faible lien chronologique entre les travaux RTM et les changements fluviaux
Reconquête forestière des fonds de vallée – Rétraction et incision	(1) Homogénéité régionale de la rétraction des bandes actives (2) Bonne correspondance chronologique entre la rétraction des bandes actives et l'abandon de l'exploitation agro-pastorale des boisements de fond de vallée	(1) La chronologie détaillée de l'installation forestière dans les anciennes bandes actives est clairement contrôlée par les paramètres morphologiques (niveaux de terrasses, gradient amont-aval) (2) Dans bien des cas, l'incision est antérieure à la rétraction du lit et elle ne peut être mise en relation avec la chenalisation des écoulements induite par la végétalisation des lits
Reconquête forestière – Sources sédimentaires	(1) La reconquête forestière a affecté la surface des sources sédimentaires sur 6 bassins versants témoins	
Reconquête forestière – Crues	(1) Mise en évidence d'un écrêtement des hydrogrammes de crue à l'échelle du 20 ^e siècle [Piégay <i>et al.</i> , sous presse]	(1) La diminution de la fréquence et de l'intensité des crues touche essentiellement les crues moyennes à fortes
Sources sédimentaires – Rétraction et incision	(1) Mise en évidence de vagues d'incision progressive en relation avec le tarissement des sources sédimentaires (2) Mise en évidence d'un processus d'édification de basses terrasses par déficit sédimentaire	



- ① Diminution de la fréquence et/ou de l'intensité des précipitations moyennes et fortes
- ② Diminution de la fréquence et/ou de l'intensité des crues morphogènes
- ③ Abandon des pratiques agricoles et reboisement spontané des versants et des fonds de vallée
- ④ Reboisement planifié des périmètres RTM
- ⑤ Rétention des sédiments dans les têtes de bassin et stabilisation des lits torrentiels
- ⑥ Augmentation de la rugosité hydraulique par boisement des plaines alluviales et augmentation du potentiel de colonisation végétal par dissémination biologique
- ⑦ Biostabilisation des processus d'érosion sur versant (ceci concerne essentiellement le ravinement)
- ⑧ Ecrêtement des pics de crue
- ⑨ Déficit sédimentaire par tarissement de la recharge

Figure 82

Modèle explicatif des changements fluviaux qui ont affecté les petites rivières torrentielles des Préalpes du Sud après 1950 ; les flèches sont d'autant plus larges que les liens entre les paramètres sont démontrés